

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

**Kompenzace akustického klikání
hřídele motoru pomocí plastové
převodové skříně**

Compensation Clicking Noise of a Motor
Shaft by Plastic Gearbox Housing

Student:

Jiří Gonda

Osobní číslo:

GON0060

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Filip Dušek

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Gonda**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Téma: **Kompenzace akustického klikání hřídele motoru pomocí plastové převodové skříně**
Compensation Clicking Noise of a Motor Shaft by Plastic Gearbox Housing
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Proveďte popis vzniku jevu akustického klikání.

Dále proveďte, pro vedoucím práce zadaného typu elektromotoru, alespoň tři konstrukční variantní realizovatelná řešení, zamezující akustickému klikání. Z těchto tří řešení zpracujte podrobné konstrukční řešení vhodné pro velkosériovou výrobu. Výkresová dokumentace bude obsahovat sestavu vámi navržené varianty plastové převodové skříně (s naznačením připojeného elektromotoru). V případě použití dalších netypových součástí zhotovte i jejich výrobní dokumentaci.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Firemní katalogy, prospekty, normy a www-stránky s danou problematikou.
2. Fotodokumentace (elektronická).
3. KALÁB, K.: Části a mechanismy strojů – teorie+projekty, www-stránky kat. 347, 2015.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Filip Dušek**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil inertní údaje o technických parametrech převodovky získaných od firmy Brose CZ spol. s r.o., Kopřivnice, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 18. května 2020

.....


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- Jsem si vědom, že na moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (školní dílo),
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- Bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu u 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě od mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020


.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Gonda

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Stará 609/16

751 31 Lipník nad Bečvou

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Filipu Duškovi za cenné rady, připomínky při vypracovávání práce a za vstřícnost při konzultacích. Dále bych rád poděkoval svému konzultantovi panu Ing. Tomáši Vlčkovi za cenné konstrukční rady a připomínky při řešení práce. V poslední řadě bych rád poděkoval firmě Brose CZ spol. s.r.o. za možnost pracovat na tomto tématu.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kompenzace akustického klikání hřídele pomocí plastové převodové skříně. Ostrava, 2020, 46 s. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce: Dušek Filip.

Bakalářská práce se zabývá zamezením akustického klikání hřídele motoru pomocí kompenzačního elementu, vloženého do převodové skříně. V úvodní části je popsán jev „klikání hřídele motoru“. V této práci jsou představeny tři řešení pro zamezení akustického klikání, a to jak interní řešení – kompenzační element/elementy, tak i externí řešení – samořezný šroub. Smyslem bakalářské práce je z těchto tří řešení vybrat jedno, které je nejvhodnější pro velkosériovou výrobu. Vybrané řešení pro velkosériovou výrobu bylo podrobně optimalizováno pro technologii výroby vstřikolisu a byla na něm provedena MKP analýza. Výkres sestavy plastové převodové skříně, výkres změněné části plastové převodové skříně, výkres originální plastové převodové skříně a výrobní výkres kompenzačního elementu jsou součástí přílohy bakalářské práce.

ANNOTATION BACHELOR THESIS

Compensation Clicking Noise of a Motor Shaft by Plastic Gearbox Housing. Ostrava, 2020, 46 p. Bachelor thesis. VŠB - Technical University of Ostrava. Supervisor of the thesis: Dušek Filip.

The bachelor thesis deals with preventing clicking noise of a motor shaft by plastic element, which is inserted into gearbox housing. In the introduction section is described „clicking noise of a motor shaft“. In this thesis are introduced three solutions, that are preventing clicking noise. The solutions are internal – compensation element/elements, and external – self-cutting screw. The main point of the bachelor thesis is to choose from these three solutions one, that is most suitable for large-scale production. The selected solution has been optimized for type of production technology – injection molding. FEM analysis has been taken as well. Attachment contains following drawings: assembly of plastic gearbox, changed part of plastic gearbox, original plastic gearbox and compensation element.

Obsah

1.	Úvod.....	1
1.1	Cíle práce	2
2.	Technologie vstřikování plastů	3
2.1	Postup při vstřikování	3
2.2	Vstřikovací cyklus	4
2.3	Tlaky ve vstřikovacím ústrojí	4
3.	Akustické klikání	6
3.1	Pohon polohování sedadla automobilu	6
3.2	Pohon stahování okénka	7
4.	Typ elektromotoru.....	8
5.	Možné varianty řešení pro zamezení akustického klikání	10
5.1	Varianta 1.....	10
5.2	Varianta 2.....	11
5.3	Varianta 3.....	12
6.	Vícekritériální analýza	13
6.1	Kritéria rozhodování	13
6.2	Stupnice hodnocení.....	13
6.3	Hodnocení jednotlivých kritérií	14
6.4	Váha významnosti jednotlivých kritérií.....	14
6.5	Vyhodnocení vícekritériální analýzy	15
7.	Detailní rozbor varianty 3	16
7.1	První návrh.....	16
7.1.1	Tvar a velikost	16
7.1.2	Díra ve středové části	17
7.1.3	Odlehčení a kontakt s hřídelí motoru	17
7.1.4	Metoda nezaměnitelnosti součástí	18

7.2	Technologické úpravy	20
7.2.1	Volba dělicí roviny	20
7.2.2	Vstřikovací bod a poloha vyhazovačů	21
7.2.3	Tloušťka stěn kompenzačního elementu	23
7.2.4	Technologické úkosy	23
7.3	Analýza metodou konečných prvků	24
7.3.1	Mechanické vlastnosti materiálu	25
7.3.2	Zatížení a vazby	26
7.3.3	Výsledky	28
7.3.4	Konstrukční úpravy dle výsledků MKP analýzy	29
8.	Toleranční analýza	34
8.1	Toleranční řetězec	34
8.2	Postup při návrhu tolerancí jednotlivých komponent tolerančního řetězce ...	37
8.3	Výsledky toleranční analýzy	38
9.	Předpokládaná montáž převodovky	41
10.	Závěr	44
11.	Seznam použitých zdrojů a software	45

Seznam použitého značení

Značka	Význam	Jednotka
C_p	index způsobilosti procesu (nebere v úvahu polohu dat)	[-]
C_{pk}	index způsobilosti procesu (bere v úvahu polohu dat)	[-]
C_{pT}	index způsobilosti procesu pro sloupec Target	[-]
C_{pP}	index způsobilosti procesu pro sloupec Projected	[-]
C_{pkP}	index způsobilosti procesu pro sloupec Projected	[-]
C_{pkT}	index způsobilosti procesu pro sloupec Target	[-]
E	modul pružnosti v tahu (Youngův modul)	[MPa]
F_{max}	maximální síla	[N]
$F_{př}$	předepínací síla	[N]
F_{Wc}	Worst case síla	[N]
G	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
L_k	hodnota axiálního posunutí hřídele	[mm]
LTT	dolní cílová tolerance (lower target tolerance)	[-]
R_e	mez kluzu materiálu	[MPa]
R_{ms}	spodní hodnota meze pevnosti	[MPa]
S_1	plocha styku hřídele a elementu před úpravou elementu	[mm ²]
S_2	plocha styku hřídele a elementu po úpravě elementu	[mm ²]
UTT	horní cílová tolerance (upper target tolerance)	[-]
p_{1Wc}	Worst case tlak před úpravou elementu	[MPa]
p_{2Wc}	Worst case tlak po úpravě elementu	[MPa]
k_b	bezpečnostní snížení meze pevnosti na mez kluzu	[MPa]
p_i	Vnitřní vstřikovací tlak	[bar]
p_s	systémový tlak	[bar]

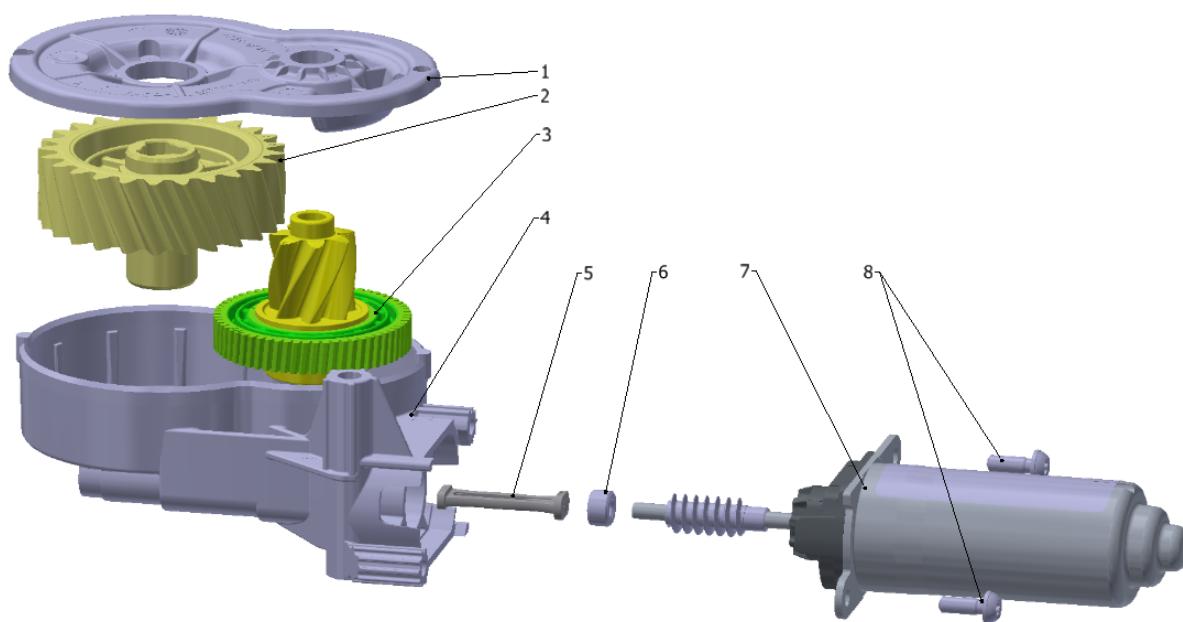
p_v	Vnější vstřikovací tlak	[bar]
t_e	tloušťka stěn elementu	[mm]
t_s	tloušťka středové části	[MPa]
t_z	tloušťka žebra	[mm]
u_T	úspěšnost procesu výroby	[%]
\bar{x}	cílová nominální hodnota	[-]
Δl	deformace elementu při Worst case stavu	[mm]
δ_n	nominální přesah	[mm]
ϑ_m	vliv motoru na toleranční výpočet	[%]
σ	koefficient šíře tolerančního pole	[-]
σ_{MAX1}	maximální napětí při prvním MKP výpočtu	[MPa]
σ_{MAX2}	maximální napětí při druhém MKP výpočtu	[MPa]
σ_{MAX3}	maximální napětí při třetím MKP výpočtu	[MPa]
μ	Poissonova konstanta	[-]
ρ	hustota použitého materiálu	[kg · m ⁻³]
φ_t	technologické úkosy	[°]

1. Úvod

Plastová převodová skříň slouží k pohonu polohování sedadla v automobilu. Obsahuje dvě soukolí, z nichž jedno je hnací (šnek na hřídeli motoru) a druhé je hnané (výstup z převodovky). Při změně otáček v systému, tj. při změně směru polohy sedadla, dochází u hřídele motoru k jevu, akustické klikání hřídele. Blíže je tento jev popsán v kapitole 3. Bakalářská práce je zaměřena na zamezení vzniku tohoto jevu.

Teoretická část se týká technologie vstřikování plastů. Touto technologií bude vyráběn plastový element, který je navržen k zamezení akustického klikání hřídele. Dále je zde uveden popis vzniku jevu „akustické klikání“ a jsou zde uvedeny možné příklady výskytu tohoto jevu.

Následně jsou představeny tři možné řešení zamezení jevu akustického klikání. Z těchto tří řešení je vybráno jedno, které vyhovuje požadavku pro velkosériovou výrobu. Pro vybrané řešení byl vytvořen toleranční řetězec a pomocí toleranční analýzy v programu Enventive, bylo vypočítáno toleranční pole přesahu (stlačení) plastového elementu. Element byl optimalizován pro technologii výroby vstřikolisu a byl podroben MKP analýze pro kontrolu napětí a posuvu v místě styku s hřídelí.



Obr. 1 Sestava převodovky pro pohon polohování sedadla v automobilu (1 – víko. 2 – kolo 2, soukolí 1, 4 – převodová skříň, 5 – kompenzační element, 6 – kluzné ložisko, 7 – motor, 8 - šrouby)

1.1 Cíle práce

S přihlédnutím k zadání práce byly vytyčeny následující cíle:

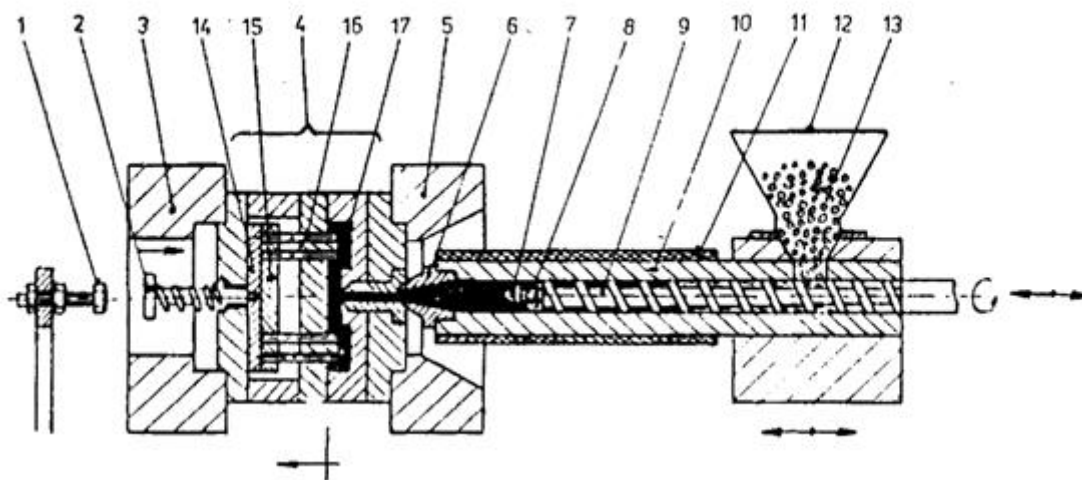
- Popis technologie, kterou se bude netypový díl (kompenzační element) vyrábět – technologie vstřikování plastů
- Popis vzniku jevu akustického klikání
- Pro zadaný typ elektromotoru provést tři konstrukční realizovatelná řešení pro zamezení akustického klikání
- Z těchto tří řešení vybrat jedno, nejvhodnější pro velkosériovou výrobu, a podrobně jej konstrukčně zpracovat
- Vytvořit výkresovou dokumentaci netypového dílu (kompenzačního elementu), změněné části plastové převodové skříně a sestavy

2. Technologie vstřikování plastů

Jedná se o nejpoužívanější technologii pro zpracování termoplastů, elastomerů, polymerních směsí a kompozitů. Technologie vstřikování plastů vychází z technologie tlakového lití, ale za použití jiných parametrů pro vstřikování (např.: teplota a tlak). Průběh výrobního cyklu se opakuje a skládá se z několika pracovních úkonů. Mezi výhody patří krátký čas vstřikovacího cyklu a schopnost vyrábět složité součásti s vysokou tvarovou i rozměrovou přesností a velmi dobrou kvalitou povrchu. Touto technologií se můžou vyrábět jak hotové díly, tak i součásti, které slouží k dalšímu kompletování výrobního celku. Technologie vstřikování je vhodná pro hromadnou a velkosériovou výrobu. [2]

2.1 Postup při vstřikování

Plast v podobě granulátu je nasypán do násypky výrobního stroje. Z násypky granulát putuje do šnekové komory, kde ho šnek stlačuje a dopravuje do tavící komory. Zde se materiál vlivem tření a teploty roztaví. Tavenina je tlačena šnekem, který ji dopravuje do formy. Tavenina zcela zaplní dutinu formy a získá její tvar. Roztavený plast předává formě teplo a postupně ztuhne ve finální výrobek. Pomocí vyhazovačů je výrobek vyhozen z kovové formy, aby prostor uvolnil pro další vstřik. Vstřikovací stroj obsahuje tlakovou komoru, ve které se zásoba vstřikovaného materiálu stále doplňuje a cyklus vstřikování se opakuje. [1]



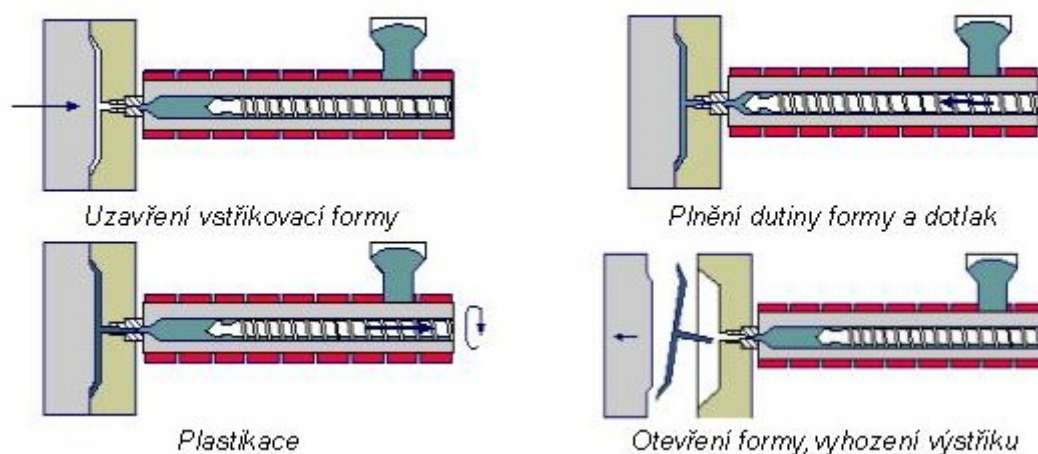
Obr. 2.1 Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací

(1 – doraz, 2 – tyč vyhazovače, 3, 5 – upínací desky, 4 – forma, 6 vstřikovací tryska, 7 – špice šneku, 8 – zpětný uzávěr, 9 – šnek, 10 – tavící komora, 11 – topná tělesa, 12 –

násypka, 13 – granulát, 14 – deska vyhazovačů, 15 – kotevní deska, 16 – vyhazovače, 17 – výstřík) [1]

2.2 Vstříkovací cyklus

Je to sled přesně specifikovaných operací, které se svou činností podílí na výrobě vstříkovaných dílů. Vstříkovací cyklus je proces, který se opakuje a dochází při něm k teplotním a tlakovým změnám vstříkovaného materiálu. Vstříkovací cyklus lze popsat dvěma způsoby, z hlediska časového průběhu vstříkovacího tlaku a z hlediska p-v-T diagramu. Pro uvedení do problematiky vstříkování plastů je dostačující pouze definovat jednotlivé tlaky ve vstříkovacím ústrojí. [2]

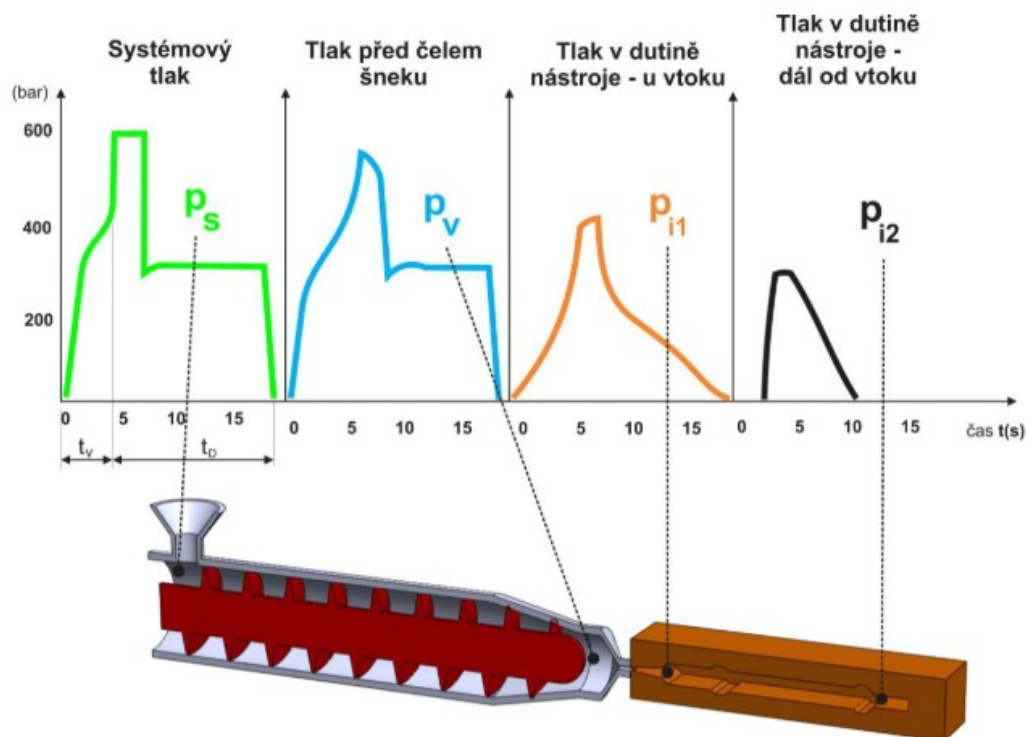


Obr. 2.2 Vstříkovací cyklus [1]

2.3 Tlaky ve vstříkovacím ústrojí

Definice jednotlivých tlaků u technologie vstříkování a znázornění jejich průběhů v závislosti na čase (viz obr. 2.3).

- Systémový tlak p_s – je možné jej naměřit v hydraulickém systému vstříkovacího stroje
- Vnější vstříkovací tlak p_v – je vztažený na jednotku plochy průřezu šneku před čelem šneku
- Vnitřní vstříkovací tlak p_i – nachází se v dutině vstříkovací formy během vstříkování



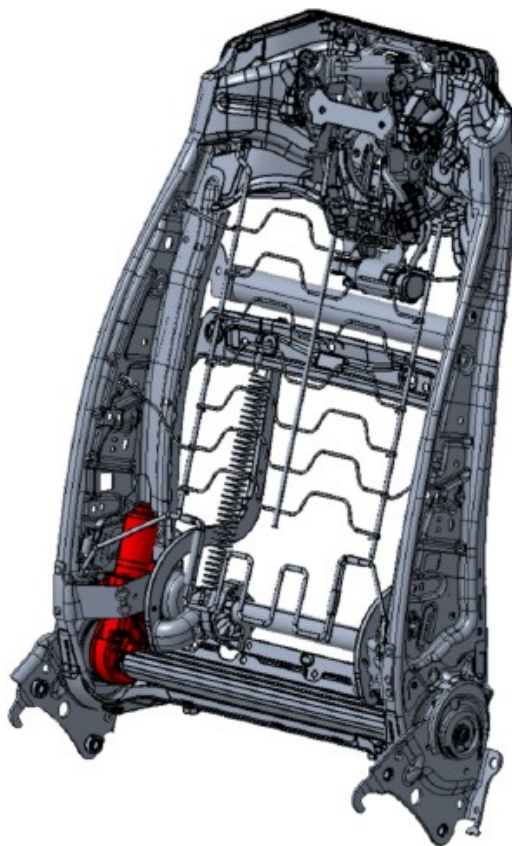
Obr. 2.3 Tlaky ve vstřikovacím ústrojí [2]

3. Akustické klikání

Akustické klikání hřídele motoru je jev, který vzniká při změně směru otáček v systému a současně při sečtení všech tolerancí součástí motoru. Hřídel motoru se axiálně posune o délkovou hodnotu a při tomto posuvu dojde k akustickému kliknutí. Tento jev je dán výrobcem motoru. Jedná se o zvuk, který je nepříjemný a zákazník si tudíž může myslet, že se jedná o poruchu. Dále jsou zde uvedeny dvě oblasti vzniku tohoto jevu.

3.1 Pohon polohování sedadla automobilu

Prvním příkladem výskytu tohoto jevu lze uvést pohon polohování sedadla v automobilu. V praxi to znamená, že k akustickému klikání hřídele motoru dochází v případě, když se střídavě mění směr polohování sedadla. Tím se změni směr otáček v systému a dojde ke kliknutí hřídele. Bakalářská práce je zaměřena na tento typ převodovky.



Obr. 3.1 Mechanismus pohonu polohování sedadla automobilu [4]

3.2 Pohon stahování okénka

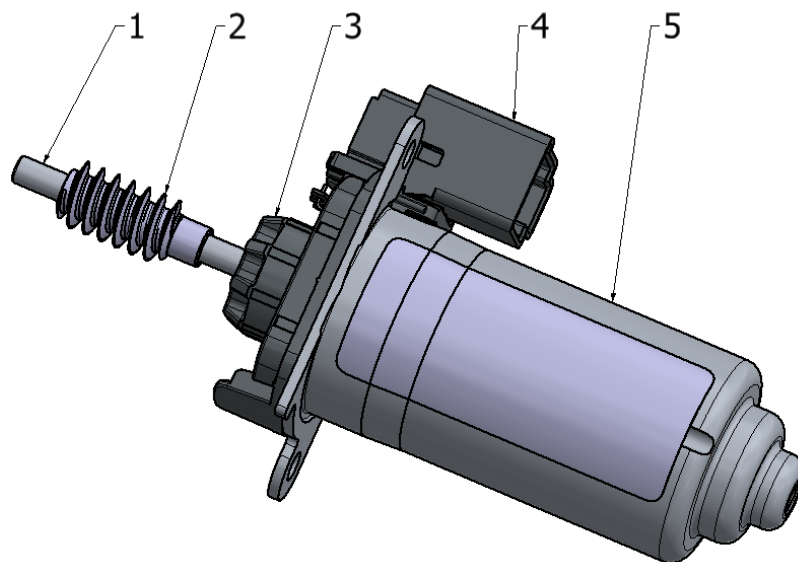
Druhým příkladem výskytu, kdy může docházet k akustickému klikání hřídele motoru je mechanismus pohonu okének v automobilu. V tomto systému dochází ke klikání při změně směru stahování okénka. Jako demonstraci vzniku tohoto jevu, lze uvést dítě, které si může hrát s pohonem okénka v automobilu, tím se rozumí polohovat okénko střídavě nahoru a dolů. Tímto polohováním se mění směr otáček v systému. Častou změnou směru otáček hřídele motoru se sečtou tolerance v motoru, a začne docházet k akustickému klikání.



Obr. 3.2 Mechanismus pohonu polohování okénka ve dveřích automobilu [4]

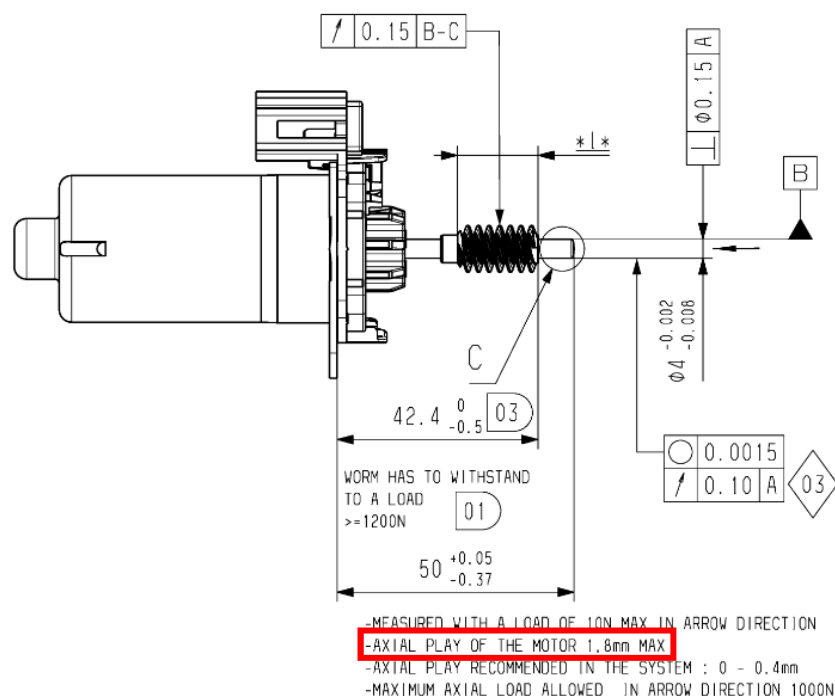
4. Typ elektromotoru

Vedoucím práce byl zadán typ elektromotoru pro pohon mechanismu polohování sedadla v automobilu. Konkrétně se jedná o typ: Motor SA BMS24SE2 PWM. V příloze je uveden výkres tohoto typu elektromotoru, spolu s příslušnými charakteristikami a schémata zapojení.



Obr. 4.1 Popis hlavních částí elektromotoru (1 – hřídel, 2 – šnek, 3 – držák hřídele, 4 – přípojka pro napájení, 5 – domeček motoru) [4]

Jak bylo dříve zmíněno, v motoru dochází vlivem sečtení tolerancí ke klikání hřídele. Následuje část výkresu elektromotoru, kde je hodnota axiálního posunutí hřídele při změně otáček v systému $L_k = 1,8 [mm]$ vyznačena. Hodnota $L_k = 1,8 [mm]$ je možné vysunuté hřídele ve volném stavu. Pro ustavení hřídele do výchozí polohy je potřeba síla $F_{př} = 100 [N]$ a poté již platí pouze tolerance uvedené na výkrese motoru. Pokud by nedošlo ke stlačení, sečetla by se hodnota $1,8 + \left(\frac{0,05}{-0,37}\right)$ a v tomto důsledku by nemusela být zabezpečena funkce. Příslušný výkres sériového šneku s uvedenou a tolerovanou hodnotou X je uveden v příloze této práce.



Obr. 4.2 Část výkresu elektromotoru s vyznačenou hodnotou axiálního posunutí (kliknutí)

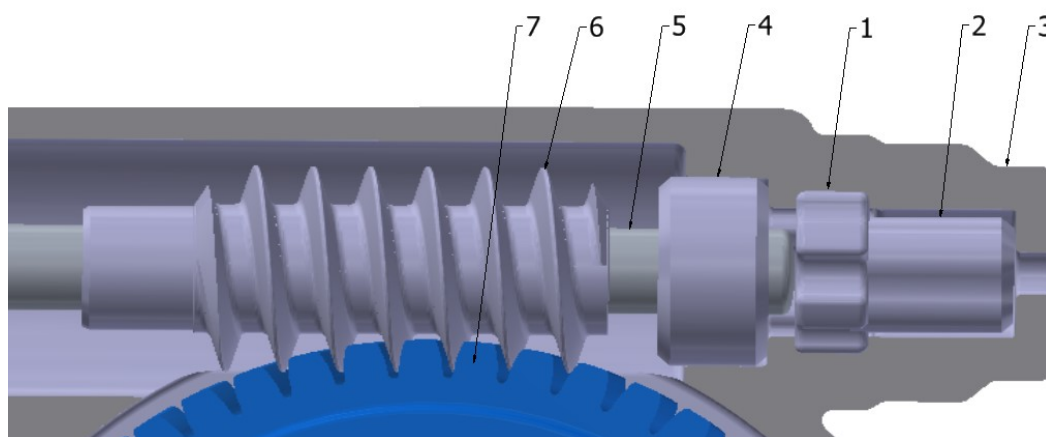
[4]

5. Možné varianty řešení pro zamezení akustického klikání

Pro zadaný typ elektromotoru byly provedeny tři realizovatelná konstrukční řešení zamezující akustickému klikání hřídele motoru. Postupně jsou zde představeny tyto řešení a pomocí vícekritériální analýzy bylo vybráno jedno, které odpovídá požadavkům na velkosériovou výrobu.

5.1 Varianta 1

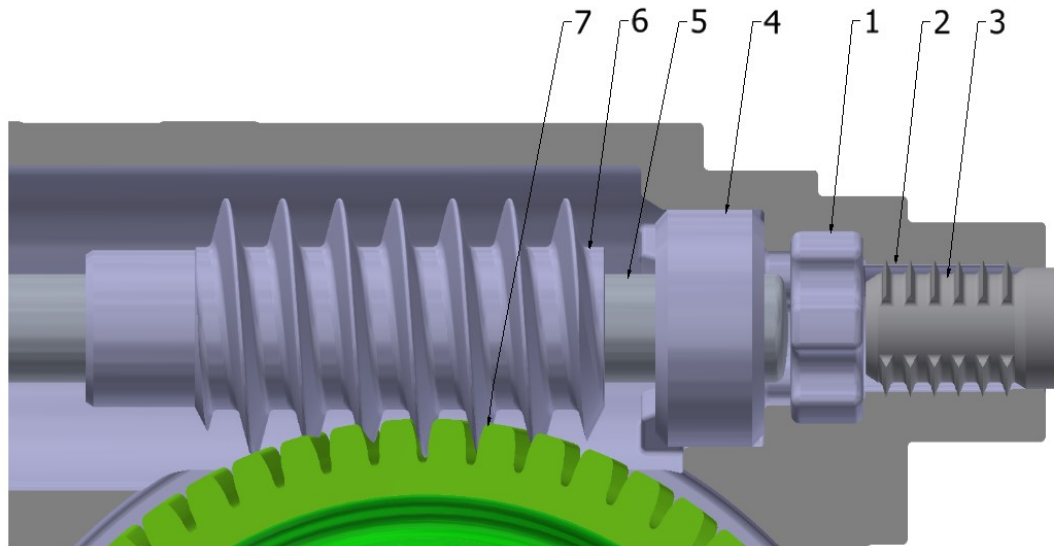
Tato varianta řešení obsahuje dvě komponenty. První komponenta tzv. kluzný element (Smartie) je konstrukčně navržena tak, aby umožnil dotyk hřídele motoru spolu s tímto komponentem. Tvar komponentu zamezuje jeho protočení uvnitř převodové skříně. Je vyrobena z materiálu Ultramid A3K schwarz 00464, jedná se o tvrdý plast, který zamezí zakousnutí ocelové hřídele do tohoto komponentu a zároveň je těžce stlačitelný. Druhá komponenta navazuje dotykem na předchozí a má za úkol být stlačována a tím zamezovat akustickému klikání hřídele. Je vyrobena z materiálu B NBR 70, jedná se gumu, která je lehce stlačitelná. Celý systém je namazaný tukem, který umožní lepší odvod tepla a zabezpečí taktéž lepší kluzné vlastnosti, jedná se o Klueber Topas L32.



Obr. 5.1 Varianta 1 (1 – kluzný element (tzv. smartie), 2 – kompenzační guma k vymezení axiálních tolerancí, 3 – převodová skříň, 4 – kluzné ložisko, 5 – hřídel motoru, 6 – šnek motoru, 7 – kolo 1)

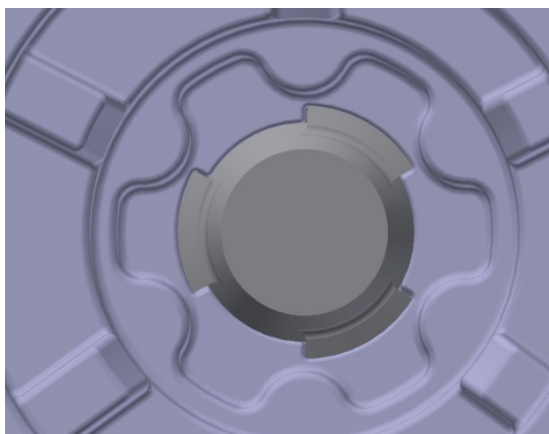
5.2 Varianta 2

Řešením je samořezný ocelový šroub a kluzný element z varianty číslo 1. Kluzný element plní stejnou funkci jako v předchozí variantě, navíc zde ale působí také jako vložka. Vložka z toho důvodu, aby se netřela ocel o ocel a aby nedošlo k uvolnění (vyšroubování) samořezného šroubu.

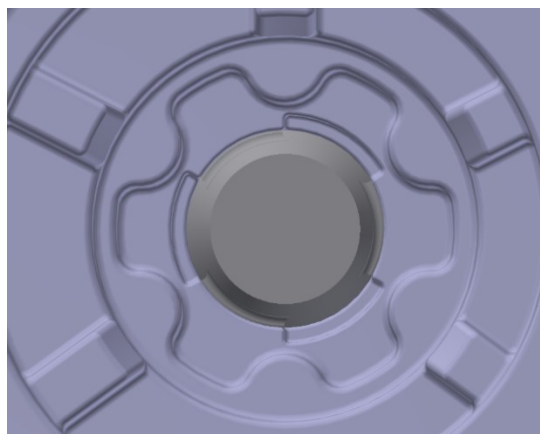


Obr. 5.2.1 Varianta 2 – před zaříznutím šroubu (1 – kluzný element (tzv. smartie), 2 – převodová skříň, 3 – samořezný šroub, 4 – kluzné ložisko, 5 – hřídel motoru, 6 – šnek motoru, 7 – kolo 1)

Montáž varianty 2 probíhá následovně: Motor je zašroubován do převodové skříně, kde je již umístěn kluzný element a zalisované ložisko. Následně je z druhé strany zašroubován speciální samořezný šroub, kde za pomoci kontroly proudu zjišťujeme průběh momentu řezání závitu. Jakmile tento moment překročí určitou hodnotu (hodnota bude zjištěna testy) a následnému dotyku kluzného elementu a hřídele motoru, dojde v systému k vymezení vůlí. Tímto je převodovka zkompletována a pokračuje dále výrobním procesem.



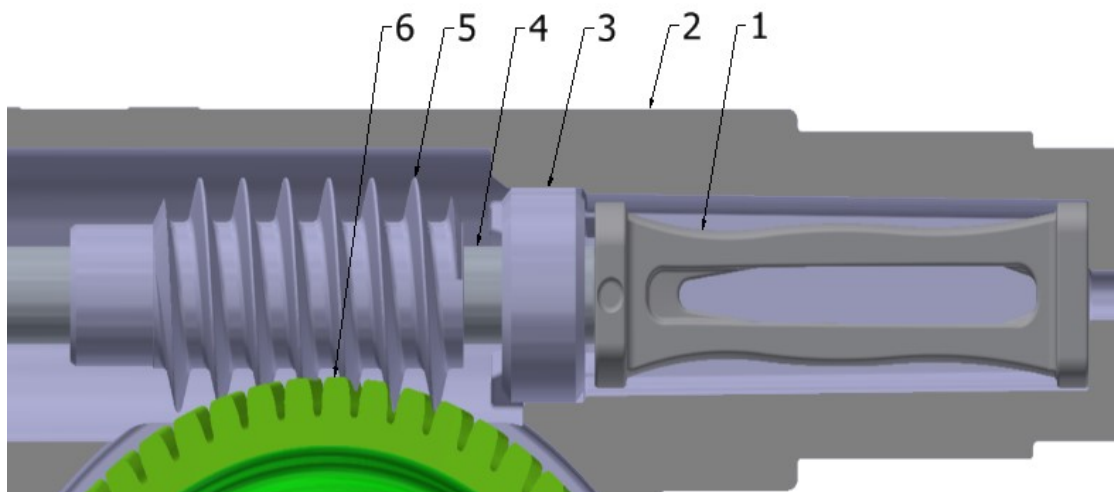
Obr. 5.2.2 samořezný šroub před zaříznutím



Obr. 5.2.3 samořezný šroub po zaříznutí

5.3 Varianta 3

Zde je do prostoru mezi hřídel motoru a převodovou skříň vložena pouze jedna komponenta – kompenzační element. Element je konstrukčně navržený tak, aby se nemohl otáčet (zabránil přenosu krouticího momentu z hřídele motoru na element) a aby byl stlačitelný a tím zabraňoval akustickému klikání hřídele motoru. Kompenzační element je vyroben z materiálu Grilon BG-40 FC – PA6-GF40. Jedná se o tvrdý plast se skelnými vlákny, který zabrání zakousnutí ocelové hřídele do elementu v místě styku. Systém je plánován mazat tukem Kleuber Topas L32.



Obr. 5.3 Varianta 3 (1 – kompenzační element, 2 – převodová skříň, 3 – kluzné ložisko, 4 – hřídel motoru, 5 – šnek motoru, 6 – kolo 1)

Pro další postup v práci, budou tyto tři varianty řešení posuzovány dle kritérií, která jsou v souladu s požadavkem na velkosériovou výrobu. Varianta, která je nejvýhodnější, byla řešena detailněji.

6. Vícekriteriální analýza

Nejvýhodnější varianta řešení bude nalezena pomocí vícekriteriální analýzy. Nejprve byly vytyčeny kritéria a stupnice hodnocení. Dále byly podle stupnice ohodnoceny varianty řešení. Ke každému kritériu byla přiřazena váha podle jeho důležitosti. Varianta, která získala největší počet bodů, je označena za nejvýhodnější.

6.1 Kritéria rozhodování

S ohledem na skutečnost, že se jedná o automobilový průmysl, bylo určeno sedm kritérií rozhodování. Kritéria jsou uvedena v Tab. 1.

Tab. 1 Kritéria rozhodování

Pořadí	Kritérium
k1	Konstrukce
k2	Funkce
k3	Hmotnost
k4	Cena
k5	Montáž
k6	Výroba
k7	Počet dílů

6.2 Stupnice hodnocení

Stupnice hodnocení je uvedena v Tab. 2, kdy největší číslo přísluší nejvýhodnější variantě řešení.

Tab. 2 Stupnice hodnocení

Hodnocení	Stupeň	známka
	Výborné	4
	Chvalitebné	3
	Dobré	2
	Nevyhovující	1

6.3 Hodnocení jednotlivých kritérií

Kritéria rozhodování byla ohodnocena pro každou variantu provedení kompenzace akustického klikání hřídele motoru. Hodnocení je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3 Hodnocení jednotlivých kritérií

-	Kritérium	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
k1	konstrukce	3	2	3
k2	funkce	3	3	4
k3	hmotnost	3	1	3
k4	cena	2	1	3
k5	montáž	3	2	4
k6	výroba	3	2	3
k7	počet dílů	2	2	4

6.4 Váha významnosti jednotlivých kritérií

Ke každému kritériu rozhodování byla přiřazena procentuální váha z celkového počtu 100 % na základě jeho významnosti, viz Tab. 4

Tab. 4 Přidělení vah jednotlivých kritérií

Pořadí	Kritérium	Váha kritéria
k1	Konstrukce	0,14
k2	Funkce	0,19
k3	Hmotnost	0,16
k4	Cena	0,16
k5	Montáž	0,11
k6	Výroba	0,14
k7	Počet dílů	0,1
Součet		1

6.5 Vyhodnocení vícekritériální analýzy

Skalárním součinem byla zhotovena vypovídající tabulka výsledků.

Tab. 5 Vyhodnocení variant

-	Kritérium	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
k1	Konstrukce	0,42	0,28	0,42
k2	Funkce	0,57	0,57	0,76
k3	Hmotnost	0,48	0,16	0,48
k4	Cena	0,32	0,16	0,48
k5	Montáž	0,33	0,22	0,44
k6	Výroba	0,42	0,28	0,42
k7	Počet dílů	0,2	0,2	0,4
součet		2,74	1,87	3,4
pořadí		2	3	1

Nejvýhodnější variantou se stala varianta 3, která je v Tab. 5 vyznačena zeleně. Tato varianta je v následujících krocích řešena detailněji, jak z hlediska konstrukce, tak i z hlediska technologie výroby a je podrobena MKP analýze.

7. Detailní rozbor varianty 3

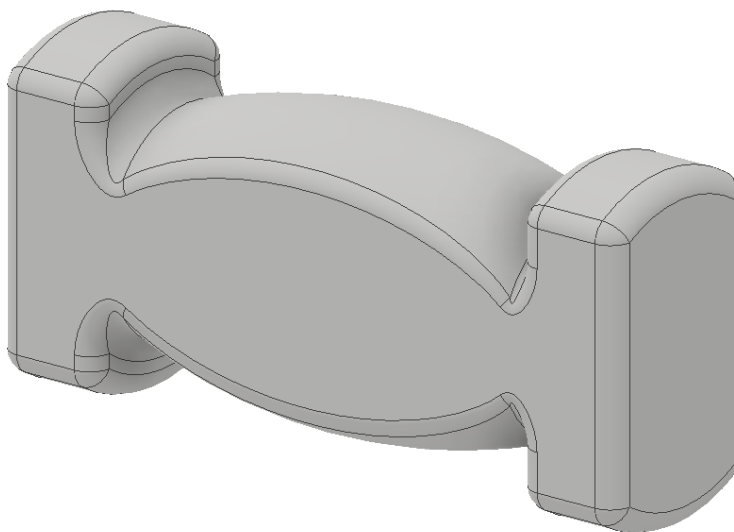
Pomocí vícekritériální analýzy byla pro kompenzaci akustického klikání hřídele motoru zvolena varianta číslo 3. Tato varianta řešení je v následujících krocích řešena detailněji, tzn. od prvního návrhu kompenzačního elementu, přes úpravy dle technologie výroby až po finální verzi, která je podrobena MKP analýze.

7.1 První návrh

Tato fáze vývoje kompenzačního elementu popisuje jeho vznik v souladu s funkčností a montáží (demonťací). Dopodrobna zde budou rozebrány jednotlivé konstrukční prvky kompenzačního elementu v této fázi vývoje.

7.1.1 Tvar a velikost

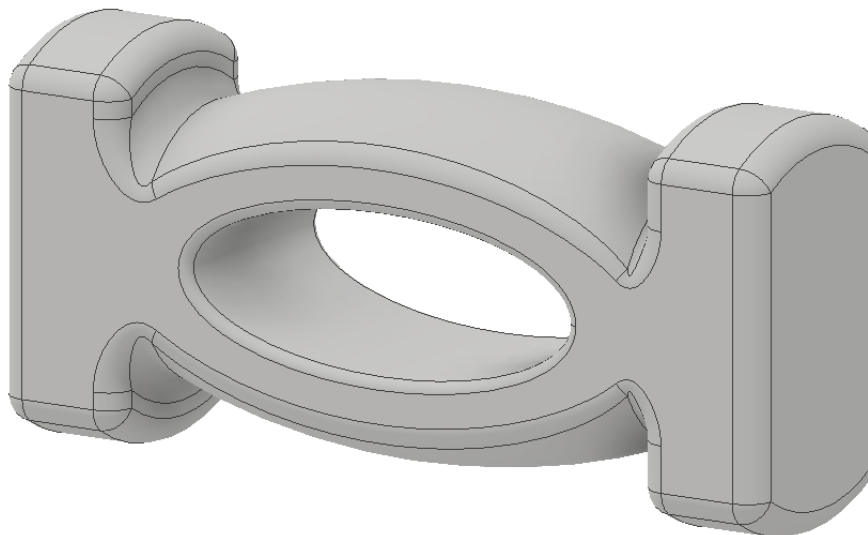
Tvar byl navrhnout s ohledem na požadavek zamezení pootočení komponentu. Důvodem je nesourodost materiálů stykových ploch v celém systému, tím by mohlo docházet ke zvýšení tření a následnému snížení účinnosti převodovky. Tohoto požadavku se docílilo za pomoci tvarového styku, obdélníkového tvaru. Tvar středové části byl zvolen obloukovitý, z předpokládané deformace v tomto směru a tím umožnit kompenzování vůle v systému a následnému zamezení akustického klikání hřídele motoru. Protože se jedná o první návrh, velikost (délka) kompenzačního elementu byla zvolena s přihlédnutím k velikosti převodové skříně a velikosti ostatních komponent sestavy.



Obr.7.1.1 Tvar a velikost kompenzačního elementu

7.1.2 Díra ve středové části

Byla přidána díra do středové části, a to z důvodu lepšího pružení kompenzačního elementu. Zatím není brán zřetel na tloušťku materiálu, protože se jedná o návrh. Tloušťka materiálu bude řešena v kapitole 7.2.

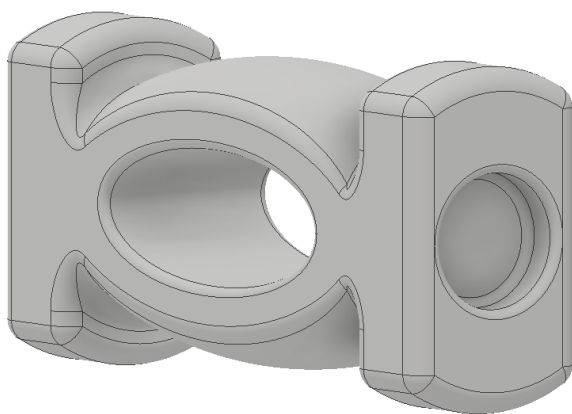


Obr. 7.1.2 Díra ve středové části

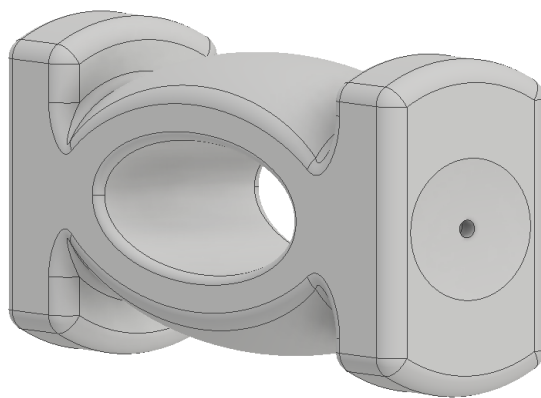
7.1.3 Odlehčení a kontakt s hřídelí motoru

Vzhledem k tomu, že se jedná o velkosériovou výrobu a kompenzačních elementů se bude vyrábět 10 mil. kusů ročně, je zde požadavek i na úsporu materiálu. Tuto úsporu zde lze zakomponovat odlehčovací dírou, která je ze strany styku kompenzačního elementu s převodovou skříní.

Další konstrukční úpravou kompenzačního elementu je místo styku s ocelovou hřídelí motoru. Bylo zde provedeno vybrání, které přímo kopíruje čelo hřídele dle výkresu. Součástí tohoto konstrukčního prvku je neprůchozí díra, která slouží jako zásobník pro mazivo, které zde bude vpraveno v průběhu montáže převodové skříně. Tepelný a pevnostní výpočet tohoto kontaktu je odzkoušen na reálných vzorcích a garantován výrobní firmou.



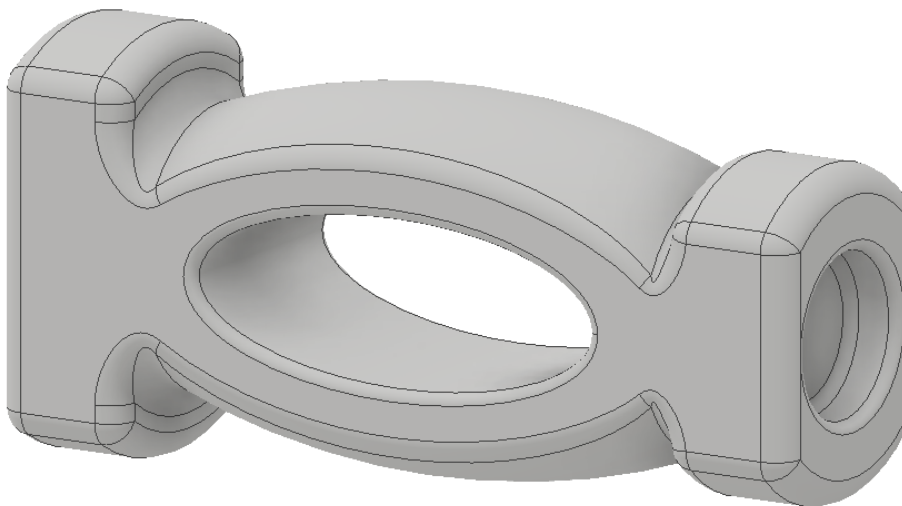
Obr. 7.1.3 Odlehčovací díra



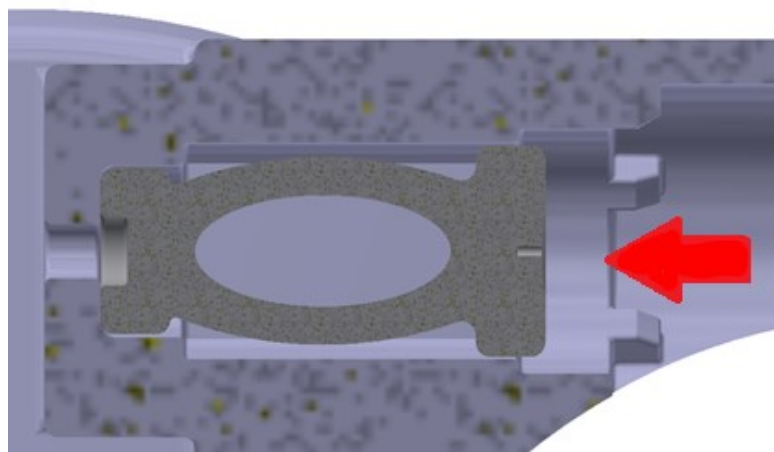
Obr. 7.1.4 Místo styku s hřídelí motoru

7.1.4 Metoda nezaměnitelnosti součástí

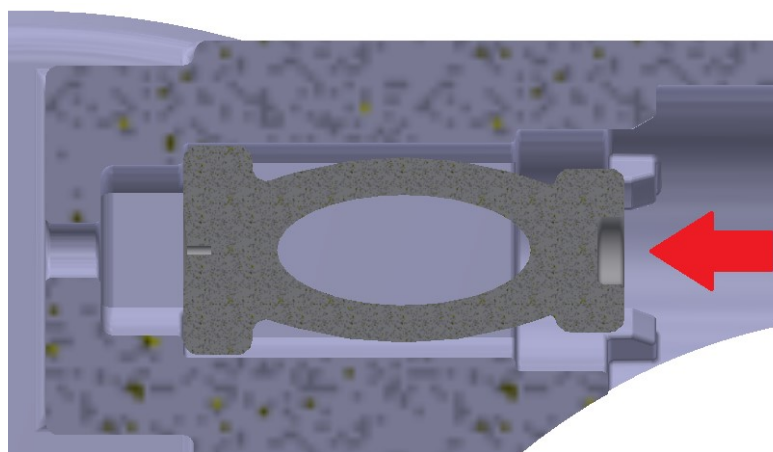
Dalším požadavkem je nezaměnitelnost součástí při montáži. Protože výrobní linka se neustále pohybuje, mohlo by se stát, že některý z pracovníků vloží součást do převodové skříně naopak. Tato možnost je nepřipustná, protože by kompenzační element ztratil funkci. Tzn.: součást musí být do převodové skříně vložena přesně tak, jak je navržena. Tohoto lze docílit použitím metody nezaměnitelnosti součástí – Poka Yoke. Úprava kompenzačního elementu je znázorněna na Obr. 7.1.5 a na Obr. 7.1.6 je vyobrazeno sestavení s protikusem (převodovou skříní), kde lze jasně vidět použití metody Poka Yoke. [6]



Obr. 7.1.5 Použití metody nezaměnitelnosti součástí



Obr. 7.1.6 Správné vložení kompenzačního elementu do převodové skříně (zobrazeno v řezu)



Obr. 7.1.7 Špatné vložení kompenzačního elementu do převodové skříně (zobrazeno v řezu)

V praxi tato metoda zabrání tomu, aby se kompenzační element vložil špatnou stranou do převodové skříně a pozbyl tím na svém významu (zamezení klikání hřídele motoru). Špatné vložení kompenzačního elementu je znázorněno na Obr. 7.1.7. Kdyby se tato skutečnost stala (vložení kompenzačního elementu špatnou stranou do převodové skříně),

konstrukční úprava zabránila zašroubování motoru a tím dodání špatného celku zákazníkovi.
[6]

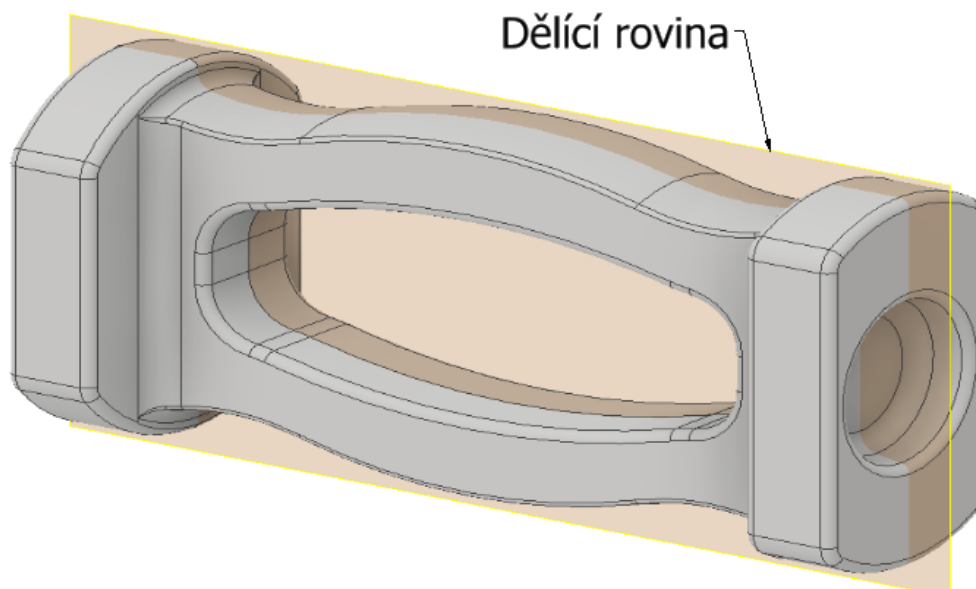
Na Obr. 7.1.5 je zobrazen výsledek prvního návrhu kompenzačního elementu. Pro další postup v práci je nutné definovat technologii výroby kompenzačního elementu. Technologie výroby kompenzačního elementu byla zvolena stejná jako technologie výroby převodové skříně a ozubených kol. Jedná se o technologii vstřikování plastů.

7.2 Technologické úpravy

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, technologie výroby byla zvolena – vstřikování plastů. Kompenzační element musí obsahovat prvky, které s touto technologií souvisí. Jmenovitě se jedná o prvky: stejnorodá tloušťka stěn materiálu, stopy po vyhazovačích, vstřikovací bod a technologické úkopy spojené s volbou dělicí roviny.

7.2.1 Volba dělicí roviny

Dělicí rovina byla zvolena s přihlédnutím k následujícímu: studený svar, předpokládaný tok vláken taveniny a tvar výstřiku.



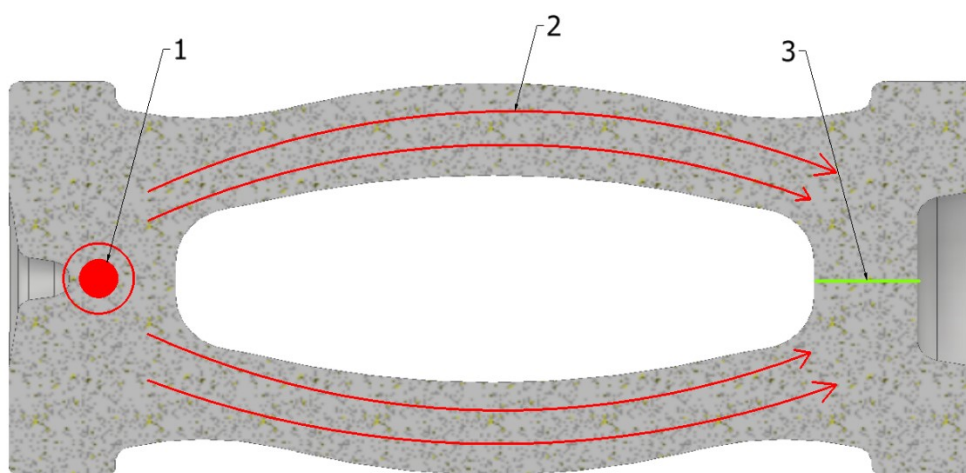
Obr. 7.2.1 Dělicí rovina

Na Obr. 7.2.1 si lze všimnout, že kompenzační element prošel změnou. Konkrétně se jedná o změnu středové části, její zúžení z důvodu estetického a také z důvodu úspory

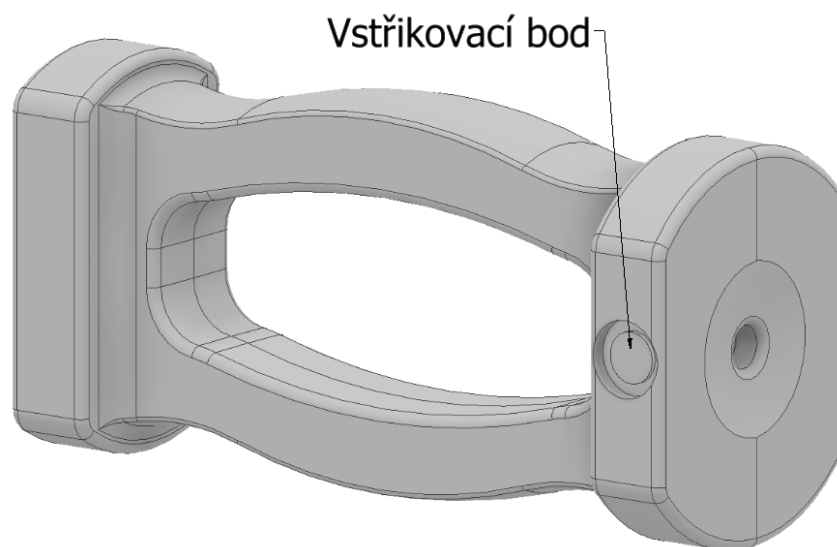
materiálu. Změna byla provedena i v konstrukční úpravě nezaměnitelnosti součásti. Tato nová změna zaručuje ve větší míře nezaměnitelnost součásti a také byla nutná z důvodu pevnostních analýz pomocí MKP softwaru viz kapitola 7.3.

7.2.2 Vstřikovací bod a poloha vyhazovačů

Dále byl určen vstřikovací bod. Tímto bodem se bude vstřikovat roztavený plast a lze předpokládat tok vláken taveniny a vznik studeného svaru. Předpoklad vzniku studeného svaru je znázorněn na Obr. 7.2.2. Požadavek na tuto oblast je, aby byla nejlépe mimo funkční části dílu, jelikož se zde nachází možný vrub což je koncentrát napětí, který může zapříčinit poškození součásti. Předpokládaný tok vláken taveniny je taktéž znázorněn na Obr. 7.2.2. Hlavním požadavkem na tok vláken taveniny je, aby se vlákna při vstřikování ideálně poskládaly ve směru předpokládaného napětí, a tím byly zatěžovány na tah/tlak, nikoliv na ohyb.

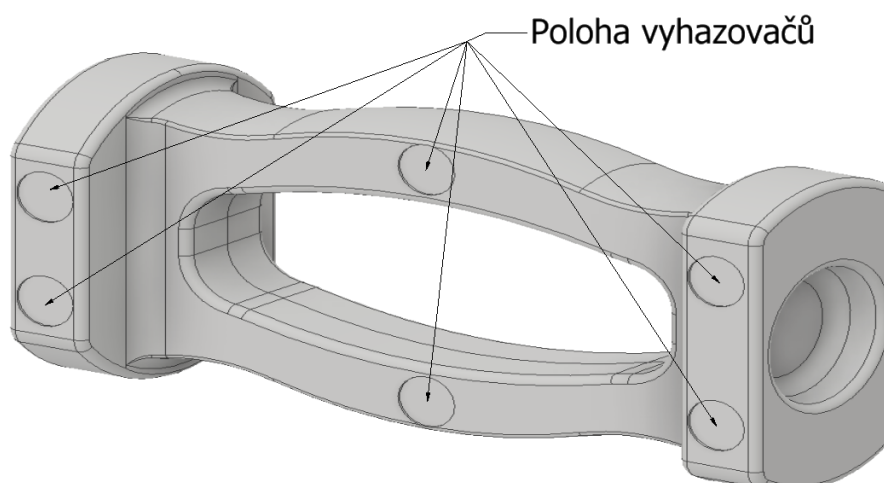


Obr. 7.2.2 Řez dělicí rovinou (1 – promítnutí vstřikovacího bodu do dělicí roviny, 2 – předpokládaný směr toku vláken taveniny, 3 – předpokládaný vznik studeného svaru)



Obr. 7.2.3 Určení vstřikovacího bodu

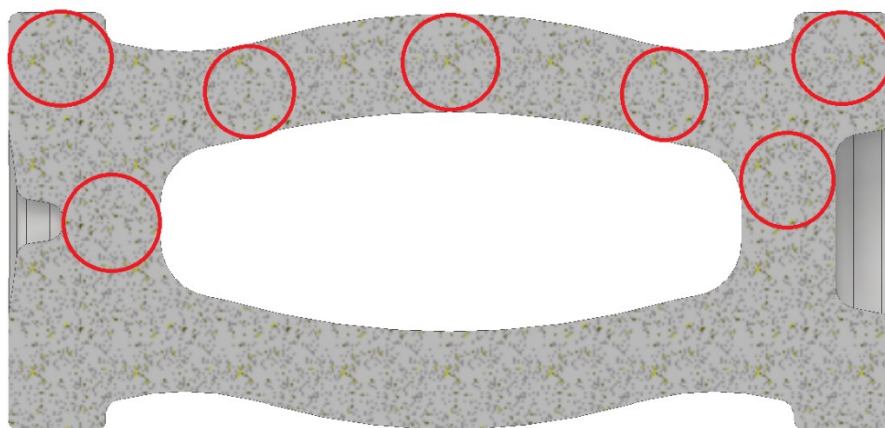
Při určení polohy vyhazovačů, byl brán zřetel na skutečnost, že vyhazovače při vyhazování výstřiku z formy tento výstřik zdeformují. Proto jsou umístěny tak, aby se výstřik zdeformoval co nejméně.



Obr. 7.2.4 Určení polohy vyhazovačů

7.2.3 Tloušťka stěn kompenzačního elementu

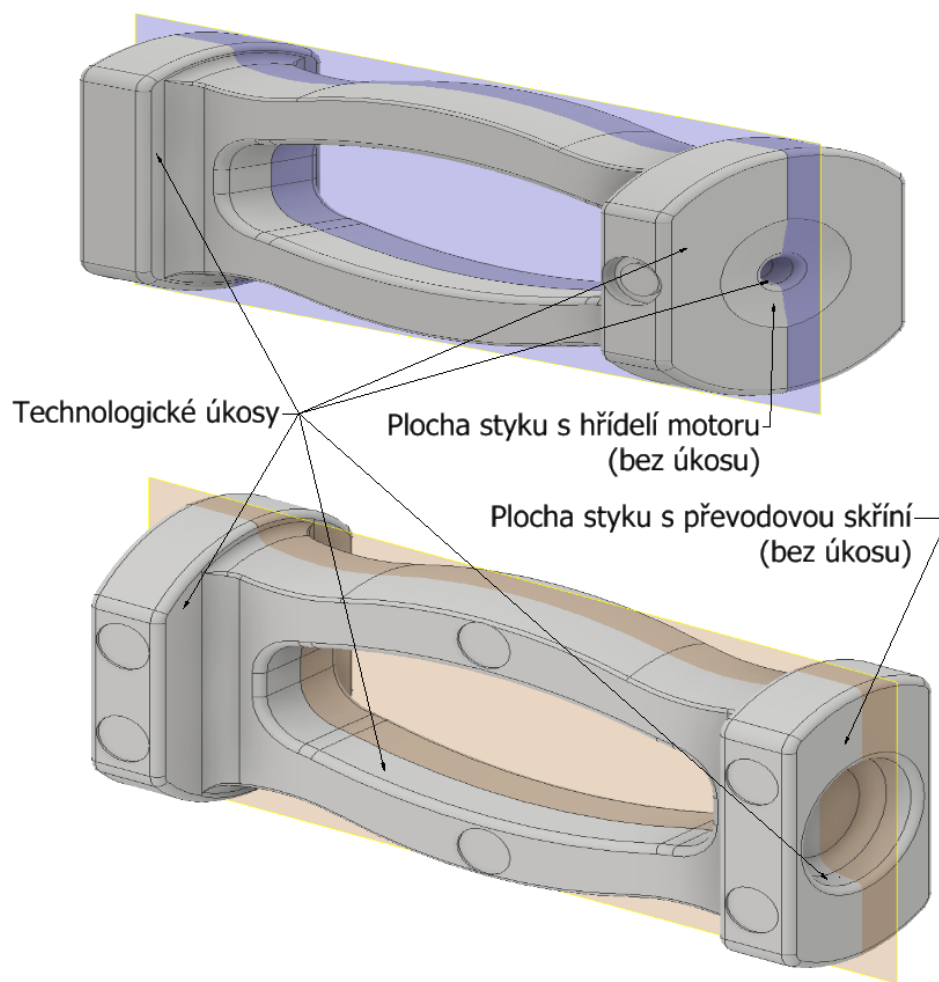
Aby nedocházelo k vadám (nedotečeniny, sraženiny) způsobeným nevhodnou konstrukcí kompenzačního elementu, je nutno zvolit jednotnou tloušťku stěn elementu. Této podmínky lze dosáhnout řezem v dělicí rovině a rozmístění kružnic o průměru zvolené tloušťky stěn elementu. Kružnice jsou tečné k hranám elementu. Kružnice jsou tečné k hranám dvoubodově. Tloušťka stěn elementu byla zvolena $t_e = 1,75 \text{ mm}$.



Obr. 7.2.5 Tloušťka stěn elementu (kružnice o průměru 1,75 mm vyznačeny červeně)

7.2.4 Technologické úkosy

Technologické úkosy slouží ke snadnějšímu vyhazování (vyjmutí) výstřiku z formy. Jsou zde také z důvodu snížení opotřebení formy vlivem tření. Technologické úkosy byly přidány do míst, kde dochází ke styku výstřiku s formou a jsou koncipovány tak, aby byl úkos veden směrem od dělicí roviny. Velikost technologických úkosů je $\varphi_t = 0,5 [^\circ]$. Plocha kompenzačního elementu, která se bude opírat o převodovou skříň, technologický úkos nemá. Na vnější straně středové části úkosy být nemusí, protože se jedná o kulovou plochu. Technologický úkos obsahuje i odlehčovací díra na straně styku kompenzačního elementu s převodovou skříní. Díra pro na straně styku kompenzačního elementu s hřídelí motoru také obsahuje technologický úkos. [8]



Obr. 7.2.6 Technologické úkosy s vyznačenou dělicí rovinou

Úkosy jsou znázorněny pouze na jedné straně dělicí roviny, samozřejmostí je, že úkosy jsou i na straně druhé.

V této fázi vývoje je kompenzační element upraven pro technologii výroby vstřikování plastů. Následují úpravy podle MKP software, kde se hledá kompromis mezi vyhověním technologii výroby a splnění pevnostní analýzy podle zadaných parametrů. Tyto úpravy jsou posledním krokem ve vývoji kompenzačního elementu.

7.3 Analýza metodou konečných prvků

Poslední konstrukční úpravy, kterými kompenzační element prošel, jsou popsány v této kapitole. Pro analýzu MKP byl zvolen software AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2019.

7.3.1 Mechanické vlastnosti materiálu

Materiál kompenzačního elementu byl zvolen: Grilon BG-40 FC – PA6-GF40. Materiálový list je uveden v příloze. Mechanické vlastnosti jsou zadány do výpočtového programu INVENTOR viz Obr. 7.3.2. [7]

CAMPUS® Datasheet

Grilon BG-40 FC - PA6-GF40
EMS-GRIVORY | a unit of EMS-CHEMIE AG



Product Texts

Product designation according to ISO 1874:
PA 6, MHR, 12-190N, GF40

Product Attributes

Improved flowability and demoulding

Markets

Automotive

Powertrain and Chassis, Interior

Electricals & Electronics

Electrical appliances, Electrical equipment, Connectors

Industry & Consumer goods

Housewares, Mechanical Engineering, Sports & Leisure, Tools & Accessories

Rheological properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Molding shrinkage, parallel	0.1 / *	%	ISO 294-4, 2577
Molding shrinkage, normal	0.6 / *	%	ISO 294-4, 2577
Mechanical properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Tensile modulus	11600 / 8500	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	230 / 150	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	3 / 5	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength, +23°C	75 / 80	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength, -30°C	70 / 75	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, +23°C	12 / 20	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength, -30°C	9 / -	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Other properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Water absorption	7 / *	%	Sim. to ISO 62
Humidity absorption	1.5 / *	%	Sim. to ISO 62
Density	1460 / -	kg/m ³	ISO 1183

Obr. 7.3.1 Část materiálového listu s vyznačenými mechanickými vlastnostmi potřebnými pro výpočet [7]

Z materiálového listu je zřejmé: Modul pružnosti v tahu $E = 8\,500$ [MPa], hustota materiálu $\rho = 1460$ [kg · m⁻³] a spodní hodnota meze pevnosti $R_{ms} = 150$ [MPa].

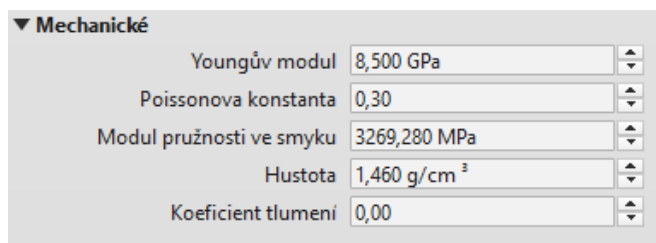
Dále je nutno pro zadání parametrů do programu INVENTOR dopočítat modul pružnosti ve smyku G [MPa] dle [12], protože tento údaj materiálový list neudává.

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{8\,500}{2(1 + 0,3)} = 3\,269 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa]

μ je Poissonova konstanta

[-]



The screenshot shows a software window titled 'Mechanické' (Mechanical) with several input fields for material properties. The values entered are: Youngův modul (Young's modulus) 8,500 GPa, Poissonova konstanta (Poisson's constant) 0,30, Modul pružnosti ve smyku (Shear modulus) 3269,280 MPa, Hustota (Density) 1,460 g/cm³, and Koeficient tlumení (Damping coefficient) 0,00.

Property	Value
Youngův modul	8,500 GPa
Poissonova konstanta	0,30
Modul pružnosti ve smyku	3269,280 MPa
Hustota	1,460 g/cm³
Koeficient tlumení	0,00

Obr. 7.3.2 Zadání mechanických vlastností do programu INVENTOR

Koeficient tlumení není nutno do výpočtu zadávat, protože na výpočet nemá vliv. Je brán ohled i na skutečnost, že kompenzační element bude v prostředí s mazivem, proto jsou do výpočtu zahrnuty hodnoty pro materiál plně nasáklý vlhkostí.

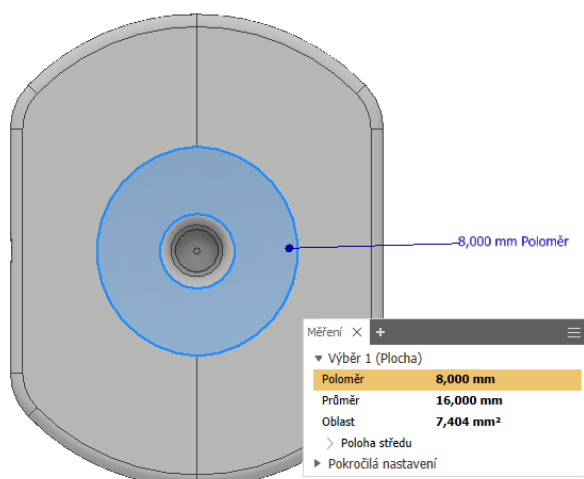
7.3.2 Zatížení a vazby

Požadavkem ze strany firmy je dána maximální síla, kterou by měl element zvládnout zachytit: $F_{\max} = 700 \text{ [N]}$. K této síle je ještě nutno přičíst sílu pro ustavení hřídele motoru do správné polohy. Tuto sílu lze také uvést jako sílu předepínací: $F_{\text{př}} = 100 \text{ [N]}$. Součet těchto sil potom dává výslednou Worst case sílu F_{Wc} .

$$F_{\text{Wc}} = F_{\max} + F_{\text{př}} = 700 + 100 = 800 \text{ [N]} \quad (2)$$

Z Pascalova zákona je známo, že síla působící na plochu je tlak. Protože čelo hřídele motoru je kulová plocha, zatížení bude tlakové. Zatížení je proto nutné přepočítat viz rovnice (3).

Plocha styku hřídele motoru a kompenzačního elementu byla určena programem INVENTOR.



Obr. 7.3.3 Určení velikosti plochy styku elementu s hřídelí

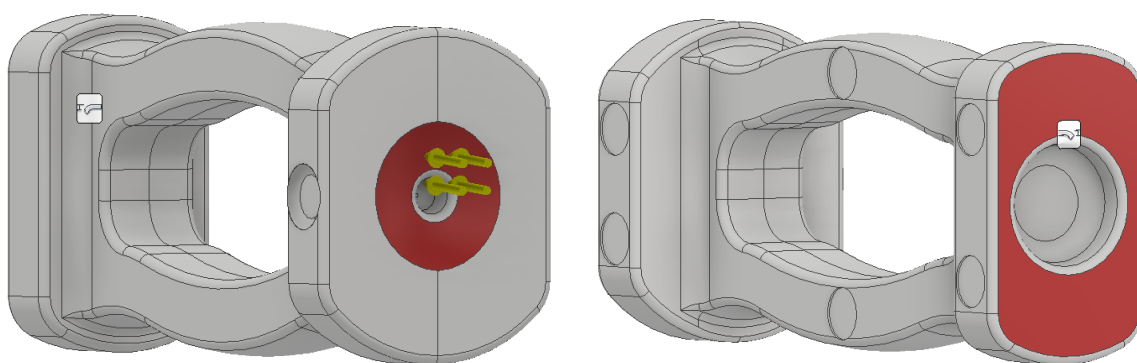
$$p_{1wc} = \frac{F_{wc}}{S_1} = \frac{800}{7,404} = 108 \text{ [MPa]} \quad (3)$$

kde p_{1wc} je Worst case tlak před úpravou elementu [MPa]

F_{wc} je Worst case síla [N]

S_1 je plocha styku hřídele motoru a elementu před úpravou elementu [mm²]

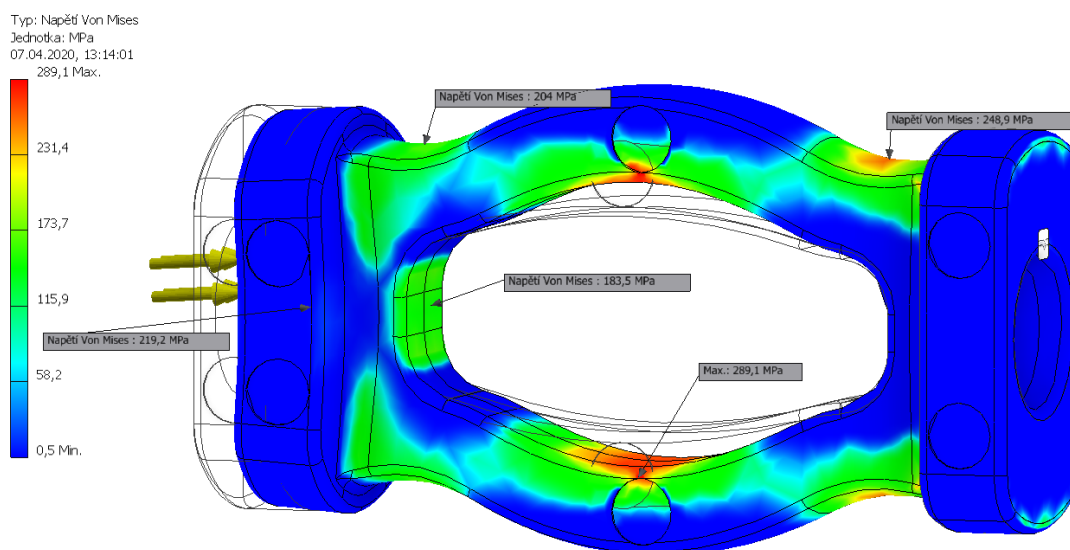
Vazba je zde pouze jedna, jedná se o místo styku kompenzačního elementu s převodovou skříní. Tato vazba byla určena jako pevná. Na Obr. 7.3.4 je znázorněno zadání zatížení a vazby do programu INVENTOR.



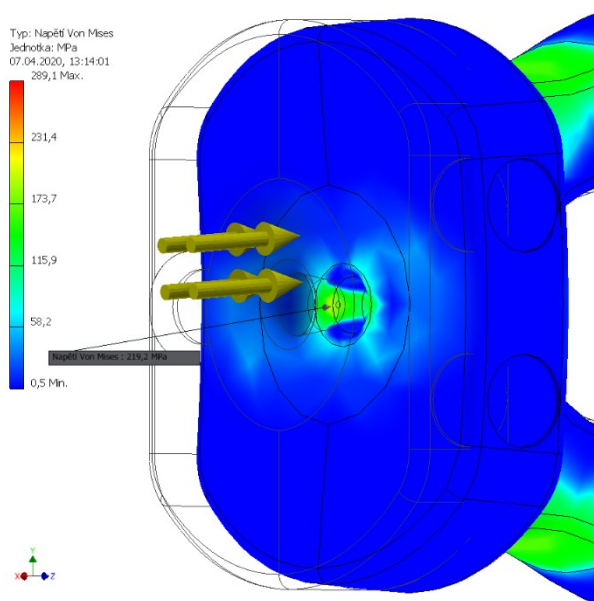
Obr. 7.3.4 Zatížení a vazby (plochy vyznačeny červeně)

7.3.3 Výsledky

Požadováno je, aby napětí kompenzačního elementu nepřesáhlo mez kluzu materiálu $R_e = 140$ [MPa] při zatížení $F_{Wc} = 800$ [N]. Jelikož mez kluzu není uvedena v materiálovém listu, byla zvolena jako spodní hodnota meze pevnosti $R_{ms} = 150$ [MPa] + bezpečnost. Zmiňovaná bezpečnost je dána jako $k_b = 10$ [MPa]. Výsledné napětí je zřejmé z Obr. 7.3.5 a z Obr. 7.3.6.



Obr. 7.3.5 Výsledné napětí



Obr. 7.3.6 Detail A – napětí

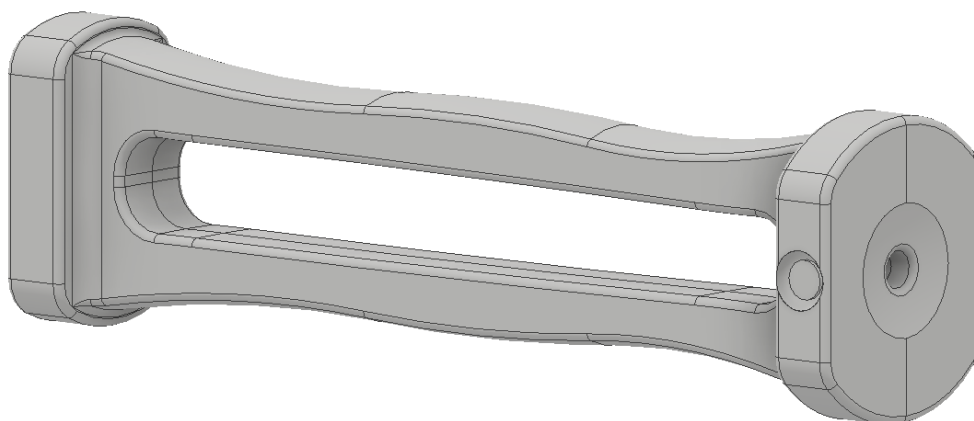
Z výsledků MKP analýzy je zřejmé, že kompenzační element pevnostně nevyhovuje, protože $\sigma_{MAX1} = 289,1 \text{ [MPa]} > \text{mez kluzu } R_e = 140 \text{ [MPa]}$ a je nutné provést další konstrukční úpravy. Tentokrát jsou konstrukční úpravy provedeny tak, aby vedly ke snížení napětí viz kapitola 7.3.4.

7.3.4 Konstrukční úpravy dle výsledků MKP analýzy

Pro snížení napětí byla zvolena metodika postupného zvětšování součástí a tím ke snižování napětí vlivem rozptýření napětí na větší plochu. Kompenzační element těmito úpravami dostal novou podobu viz Obr. 7.3.7. Co se týká detailu A na Obr. 7.3.6, zde byl zvětšen odkosovací úhel a tím došlo ke změně stykové plochy s hřídelí motoru z $S_1 = 7,404 \text{ [mm}^2\text{]}$ na $S_2 = 7,207 \text{ [mm}^2\text{]}$. Změní se tedy i hodnota tlaku působícího na tuto plochu.

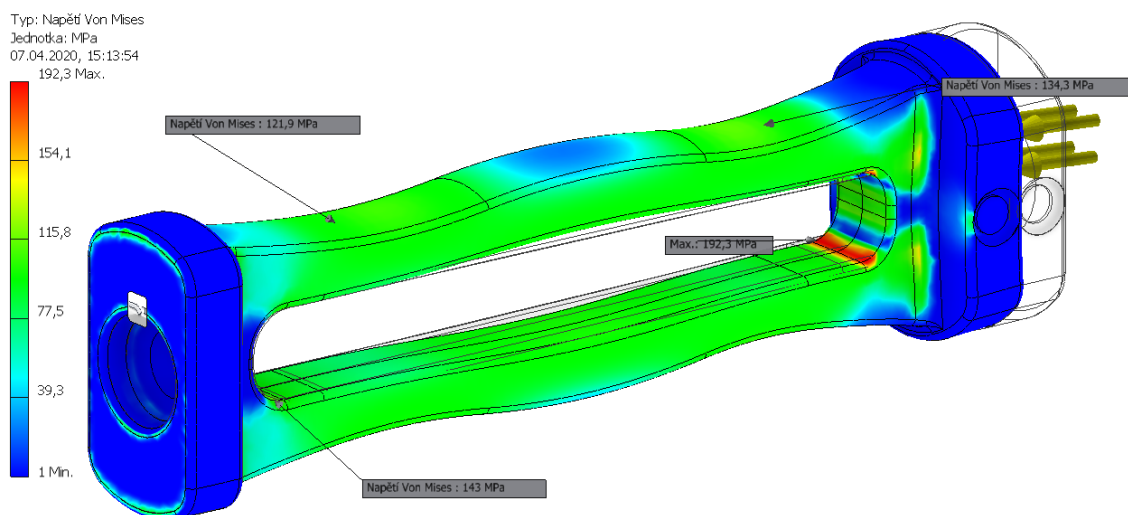
$$p_{2Wc} = \frac{F_{Wc}}{S_2} = \frac{800}{7,207} = 111 \text{ [MPa]} \quad (4)$$

kde	p_{2Wc}	je Worst case tlak po úpravě elementu	[MPa]
	F_{Wc}	je Worst case síla	[N]
	S_2	je plocha styku hřídele motoru a elementu po úpravě elementu	[mm ²]

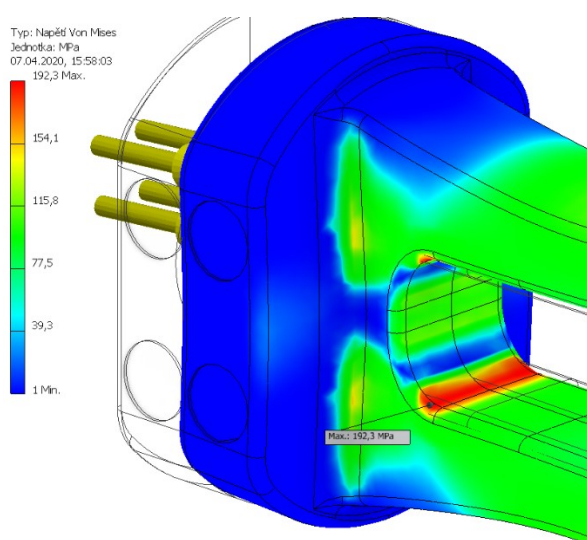


Obr. 7.3.7 Element po úpravách pro snížení napětí

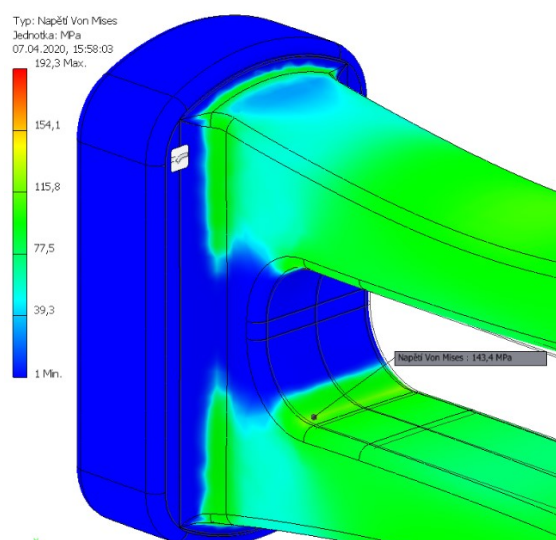
Byla znovu provedena MKP analýza na upraveném kompenzačním elementu, výsledek je zobrazen na Obr. 7.3.8.



Obr. 7.3.8 MKP analýza po úpravách pro snížení napětí



Obr. 7.3.9 Detail A – Středová část 1



Obr. 7.3.10 Detail B – Středová část 2

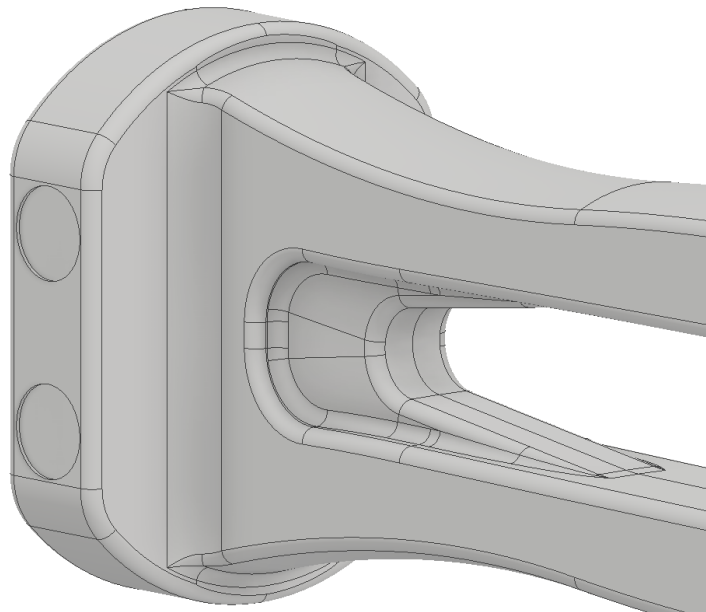
Výsledkem konstrukčních úprav je snížení napětí. Kompenzační element má nyní délku $L_E = 27 [mm]$, pokud by byl delší, přesáhl by rozměry převodové skříně. Tato skutečnost nesmí nastat, protože je nežádoucí.

Stále platí, že $\sigma_{MAX2} = 192,3 [MPa] > \text{mez kluzu } R_e = 140 [MPa]$, musí proto dojít k profilové změně ve středové části. Konkrétně v detailních pohledech na Obr. 7.3.9 a Obr. 7.3.10. Snížení napětí v těchto místech lze provést přidáním žeber. Žebra místo zpevní a tím se zmenší napětí. Konstrukce žeber byla volena na základě konzultací a dle [8]. Následuje výpočet tloušťky žebra dle [8] ve středové části:

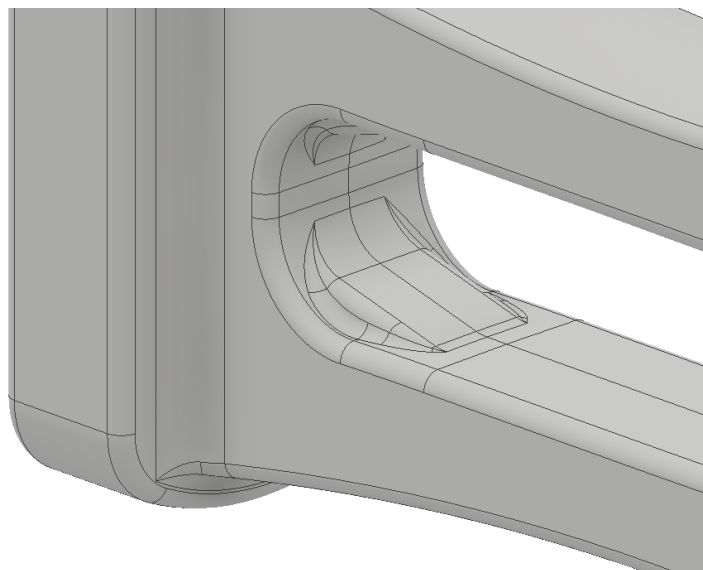
$$t_z = \frac{2}{3} \cdot t_s = \frac{2}{3} \cdot 2,4 = 1,6 \text{ [mm]} \quad (5)$$

kde t_z je tloušťka žebra [mm]
 $\frac{2}{3}$ je konstanta pro volbu žebra [-]
 t_s je tloušťka středové části [mm]

Kompenzačnímu elementu byla přidána celkem 3 žebra a detaily provedení jsou znázorněny na Obr. 7.3.11 a na Obr. 7.3.12.



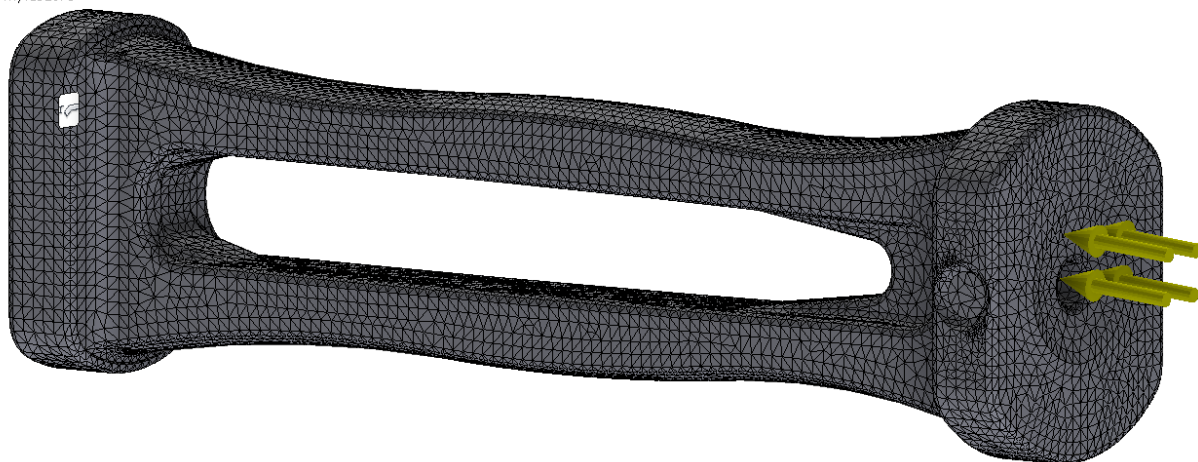
Obr.7.3.11 Detail konstrukce žebra v místě největšího napětí viz Obr. 7.3.11



Obr.7.3.12 Detail konstrukce žebra v místě detailu B viz Obr. 7.3.12

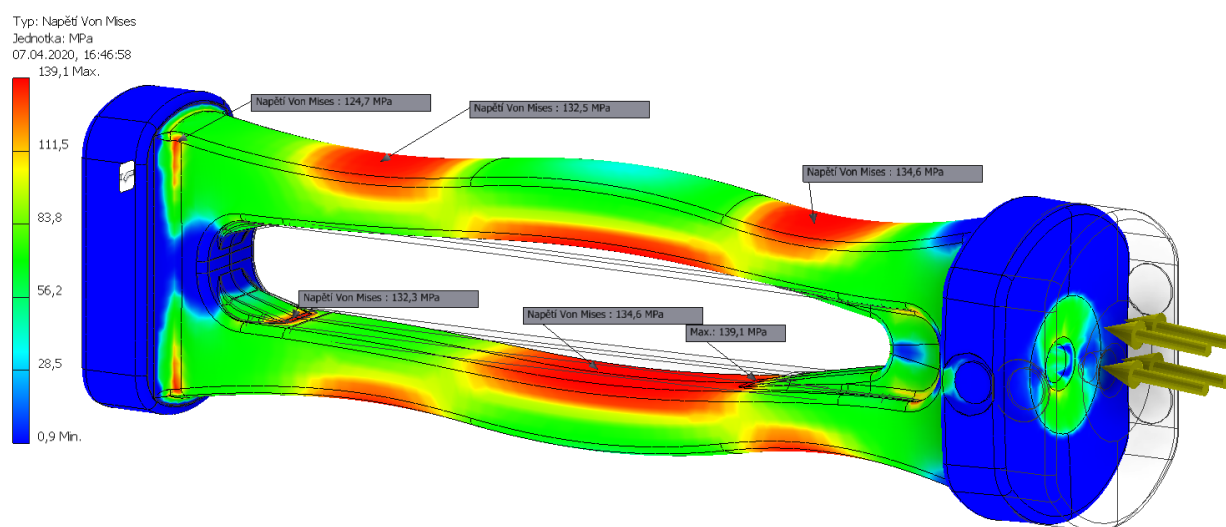
Protože se kompenzační element v této fázi vývoje začal přibližovat k požadovanému minimálnímu napětí (mezi kluzu R_e), je čas začít se zabývat přesností výpočtu a tím i velikostí elementů sítě. Výpočet se považuje za přesný, pokud se postupným zjemňováním sítě ustálí hodnoty výsledků napětí. Tento postup byl proveden a použitá síť pro výpočet je zobrazena na Obr. 7.3.13.

Uzly:197677
Prvky:132073



Obr. 7.3.13 Pohled sítě

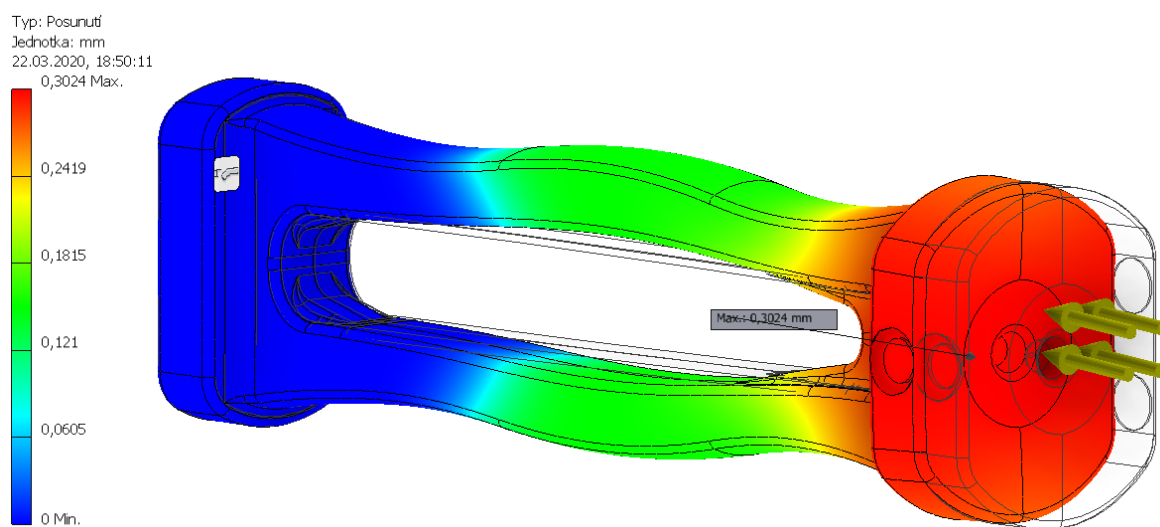
Upravený kompenzační element byl znovu podroben MKP analýze, výsledek je zobrazen na Obr. 7.3.14.



Obr. 7.3.14 Výsledné napětí elementu po přidání žeber

Z výsledného maximálního napětí $\sigma_{\text{MAX3}} = 139,1$ [MPa] je zřejmé, že hodnota napětí nepřekročila mez kluzu $R_e = 140$ [MPa]. Kompenzační element pevnostně vyhovuje.

Pro potřebu toleranční analýzy viz kapitola 8 je třeba znát stlačení (deformaci) kompenzačního elementu v místě styku s hřídelí.



Obr. 7.3.15 Deformace elementu v místě styku s hřídelí

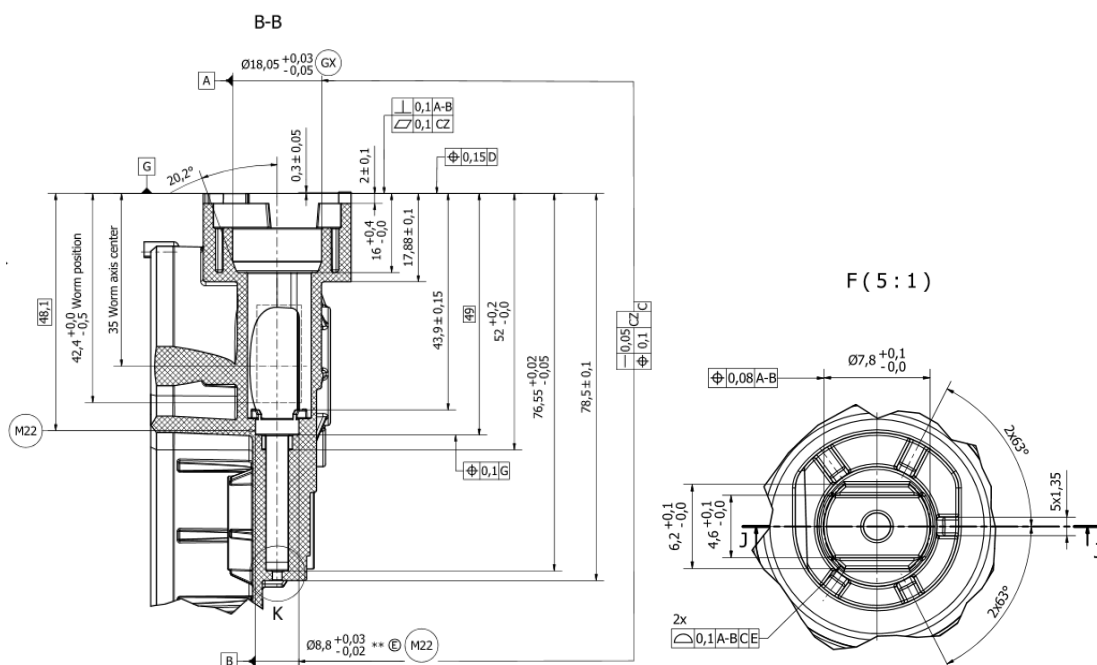
Z Obr. 7.3.15 je zřejmé, že deformace při Worst case stavu je $\Delta l = 0,3$ [mm]. K této hodnotě deformace se bude při toleranční analýze přibližovat pomocí tolerancí ostatních dílů tak, aby byla způsobilost výroby co nejvyšší a zároveň aby toleranční pole pokrylo deformaci kompenzačního elementu při Worst case stavu.

8. Toleranční analýza

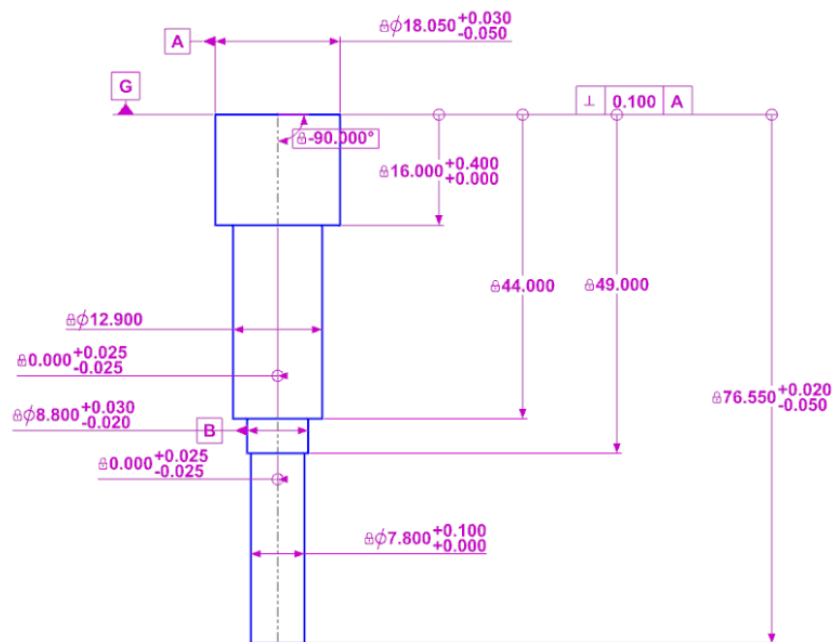
Pro potřebu toleranční analýzy byl využit program ENVENTIVE. Nejprve je nutné sestavit toleranční řetězec, který se skládá z následujících komponent: převodová skříň, kompenzační element, kluzné ložisko a motor. Pomocí nominálních rozměrů se vygeneroval nominální přesah, který se následně pomocí tolerancí ostatních dílů tolerančního řetězce měnil tak, aby pokryl deformaci kompenzačního elementu při Worst case stavu.

8.1 Toleranční řetězec

Sestavení tolerančního řetězce znamená překreslit jednotlivé díly do výpočtového programu ENVENTIVE jedna ku jedné, jak definuje výkres. Primárním cílem je určit vhodný řez, který bude reflektovat řešenou oblast. V tomto případě se jedná o řez B-B zobrazený na výkrese převodové skříň. Níže jsou uvedeny příklady převedení do výpočtového programu ENVENTIVE pro dvě komponenty: převodová skříň, kompenzační element. Je to z toho důvodu, protože se jedná o nejvíce obsáhlé výkresy. Převedení ostatních komponent (motor, ložisko) proběhlo na stejném principu.

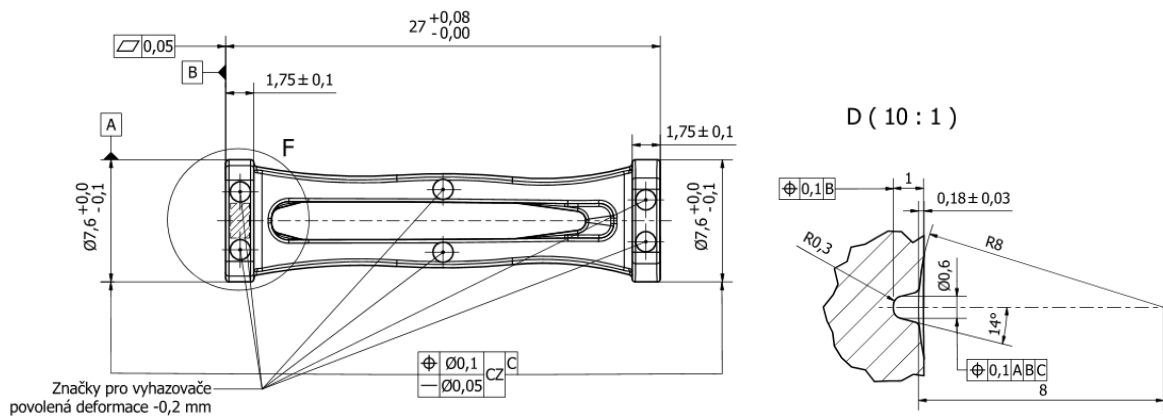


Obr. 8.1.1 Detaily výkresu převodové skříň potřebné pro překreslení do programu ENVENTIVE

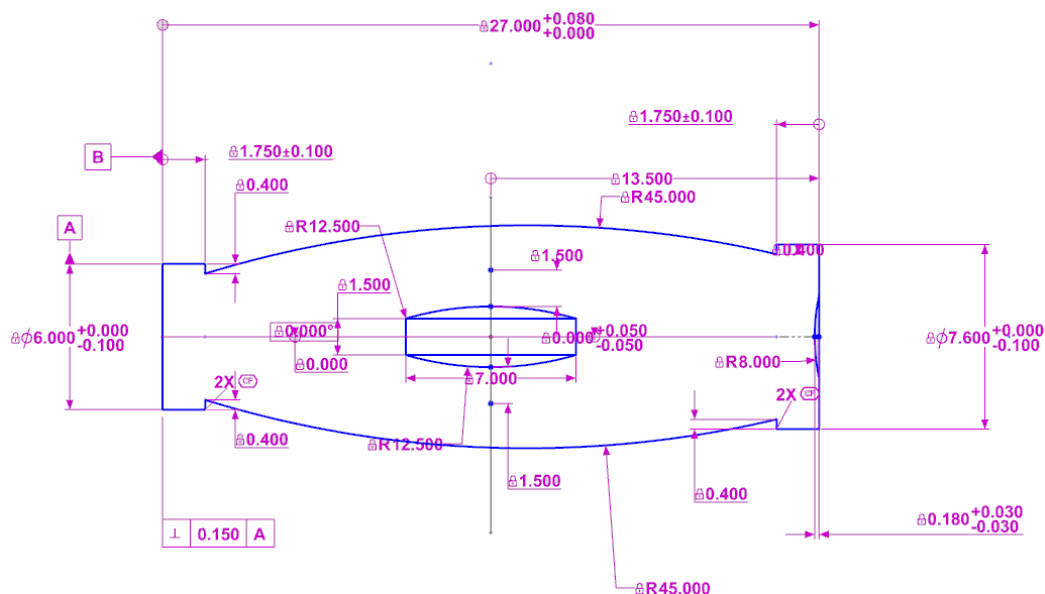


Obr. 8.1.2 Překreslení části převodové skříně do programu ENVENTIVE

Dále je zde uveden příklad přenesení z výkresu kompenzačního elementu do výpočtového programu ENVENTIVE. Opět jsou z výkresu uvedeny pouze potřebné detaily pro výpočet.



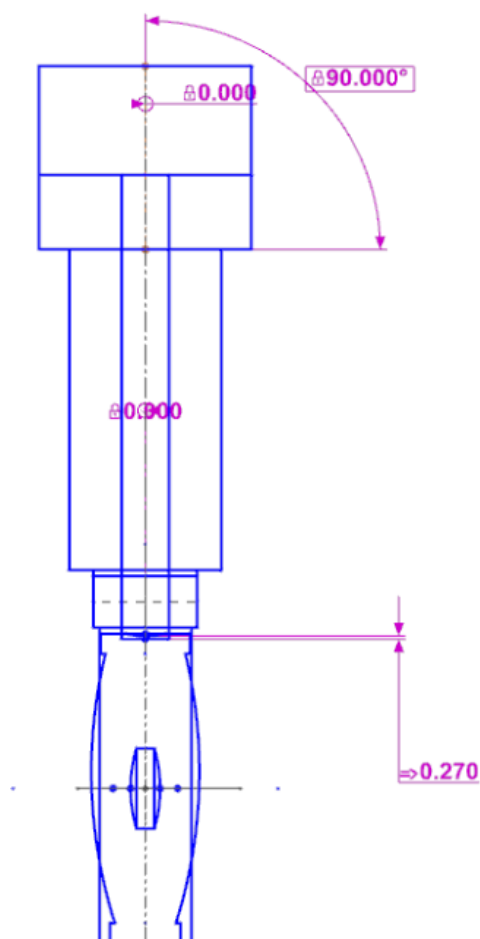
Obr. 8.1.3 Detaily výkresu kompenzačního elementu potřebné pro překreslení do programu ENVENTIVE



Obr. 8.1.4 Překreslení kompenzačního elementu do programu ENVENTIVE

Z Obr. 8.1.4 je zřejmé, že se nejedná úplně o přesnou kopii kompenzačního elementu dle výkresu. Pro toleranční výpočet je použit zjednodušený model, který je dostačující, protože obsahuje funkční kóty s tolerancemi, které jsou uvedeny na výkresu. Jedná se jen o kóty a jejich tolerance ve směru vodorovném, pouze tyto kóty mají vliv na toleranční výpočet celého tolerančního řetězce.

Nyní je možné sestavit z překreslených komponent ve výpočtovém programu ENVENTIVE toleranční řetězec viz Obr. 8.1.5. V tolerančním řetězci byl vygenerován nominální přesah $\delta_n = 0,27$ [mm]. Toleranční meze jsou $+0,209$ [mm] a $-0,41$ [mm]. Jedná se o mezní hodnoty tolerančního pole.



Obr. 8.1.5 Výsledný toleranční řetězec skládající se z komponent: kompenzační element, kluzné ložisko, motor a potřebná část převodové skříně

Následující kapitola popisuje postup při navrhování tolerancí komponent tolerančního řetězce v závislosti na indexu způsobilosti výroby a pravděpodobnostním rozložení výskytu vypočítaného tolerančního pole.

8.2 Postup při návrhu tolerancí jednotlivých komponent tolerančního řetězce

Nejprve je nutno určit rozměry, které přímo tvoří toleranční řetězec (navazují na sebe dotykem). Jmenovitě jde o tyto rozměry: Délka hřídele motoru, hloubka kulové plochy dotyku s hřídelí motoru kompenzačního elementu, délka umístění v převodové skříní, kompenzační element. Rozměry jsou určeny viz Obr. 8.2.1. Těmto rozměrům se následně měnily toleranční pole tak, aby se dosáhlo pokrytí stlačení (deformace) kompenzačního elementu při Worst case stavu zatížení $\Delta l = 0,3 \text{ [mm]}$ a zároveň aby byla dolní hodnota

tolerance > 0. Kdyby dolní hodnota tolerance byla < 0, nenastal by přesah (nastala by vůle) a docházelo by k akustickému klikání hřídele motoru.

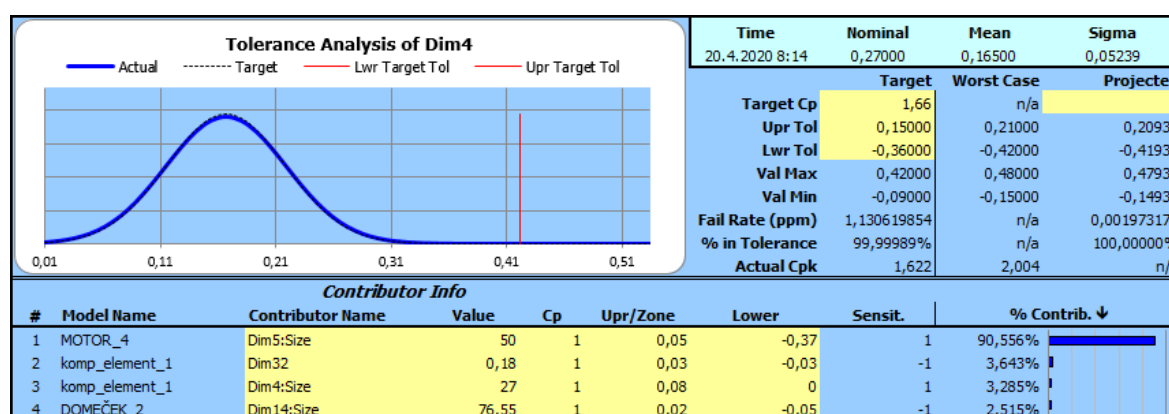
Contributor Info								
#	Model Name	Contributor Name	Value	Cp	Upr/Zone	Lower	Sensit.	% Contrib. ↓
1	MOTOR_4	Dim5:Size	50	1	0,05	-0,37	1	90,556%
2	komp_element_1	Dim4:Size	27	1	0,08	0	1	3,285%
3	DOMEČEK_2	Dim14:Size	76,55	1	0,02	-0,05	-1	2,515%
4	komp_element_1	Dim32	0,18	1	0,03	-0,03	-1	3,643%

Obr. 8.2.1 Nominální hodnoty tolerančního řetězce a jejich tolerance

Toleranční pole lze měnit jen u těch komponent, které budou vyráběny. Motor, který bude dodáván, má tolerance předepsané výrobcem (nelze je tedy měnit). Z Obr. 8.2.1 je zřejmé, že motor má největší vliv na výpočet celého tolerančního řetězce $\vartheta_m = 90,556$ [%], protože má největší toleranční pole.

8.3 Výsledky toleranční analýzy

Jak bylo zmíněno v kapitole 8.2, byly komponentám přiřazeny tolerance, které byly v průběhu výpočtu měněny v závislosti na indexu způsobilosti procesu C_{pk} [–] a v závislosti na splnění podmínky vzniku přesahu viz. kapitola 8.2. Dále bylo potřeba nastavit meze, za které se proces nesmí dostat, pak by byl proces nezpůsobilý. Meze byly nastaveny ve sloupci Target, horní cílová tolerance (upper target tolerance) $UTT = 0,42$ [–] a dolní cílová tolerance (lower target tolerance) $LTT = -0,09$ [–]. Výsledky jsou zřejmé z Obr. 8.3.



Obr. 8.3 Výsledky toleranční analýzy

Index způsobilosti procesu C_p [–] určuje okamžitou způsobilost procesu. Je dán poměrem mezi tolerančními limity a variabilitou procesu. Index způsobilosti C_p [–] nebere

v úvahu polohu dat (v Obr. 8.3 je průběh tohoto indexu způsobilosti procesu C_p [-] vyznačen tečkovanou čarou). Oproti tomu dříve zmíněný index způsobilosti procesu C_{pk} [-] vyjadřuje polohu stávajícího procesu a uvádí skutečný obraz toho, co proces dosáhl (v Obr. 8.3 je průběh tohoto indexu způsobilosti procesu C_{pk} [-] vyznačen modrou čarou). Výpočetní program ENVENTIVE tuto hodnotu vypočítal, ale pro ověření ji lze vypočítat i manuálně, a to použitím vzorce dle [11]. Výpočet byl proveden pro sloupec Target z Obr. 8.3:

$$C_{pkT} = \frac{\min(UTT - \bar{x}; \bar{x} - LTT)}{3\sigma} = \frac{\min(0,42 - 0,165; 0,165 - (-0,09))}{3 \cdot 0,05239} = 1,622 [-] \quad (6)$$

kde	UTT	je horní cílová tolerance (upper target tolerance)	[-]
	LTT	je dolní cílová tolerance (lower target tolerance)	[-]
	\bar{x}	je cílová nominální hodnota	[-]
	σ	je koeficient šíře tolerančního pole	[-]
	C_{pkT}	je index způsobilosti procesu pro sloupec Target	[-]

Hodnoty C_p a C_{pk} se různí v závislosti na průmyslovém odvětví, složitosti procesu a požadavku zákazníka. Maximální možná hodnota, kterou můžou indexy C_p a C_{pk} dosáhnout je 2. Toto nastává v případě, že se dosáhne procesu Six Sigma. Proces Six Sigma znamená, že úspěšnost výroby je 100 [%]. Doporučenou hodnotou pro indexy C_p a C_{pk} pak bývá hodnota větší než 1. [10]

Nyní k vyhodnocení Toleranční analýzy dle Obr. 8.3:

Sloupec Projected značí stav, kterého chceme v procesu výroby dosáhnout. To znamená: maximální možná úspěšnost výroby => žádný z vyrobených kusů nebude vadný a dosáhne se procesu Six Sigma, hodnoty C_{pP} a C_{pkP} dosáhnou maxima = 2 [-].

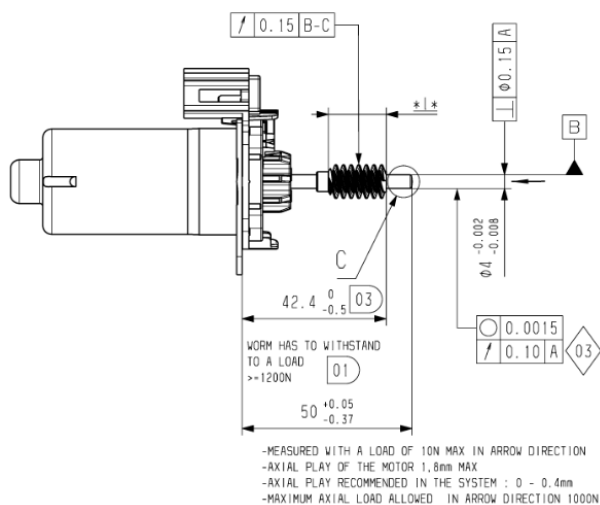
Sloupec Target značí stav, kterého jsme v procesu výroby schopni dosáhnout. To znamená: úspěšnost výroby $u_T = 99,99$ [%] při zmetkovitosti 1,13 kusů z milionu vyrobených kusů. Indexy způsobilosti výroby jsou při tomto stavu $C_{pT} = 1,66$ [-] a $C_{pkT} = 1,622$ [-].

Jako kontrolu správnosti výpočtu lze uvést podmínku dle [11]: Pokud je proces vycentrován, pak je $C_{pk} = C_p$. Pokud se proces vzdálí od nominální hodnoty (naš případ), pak je vždy $C_{pk} < C_p$. Tato podmínka je splněna, protože $1,622 < 1,66$. Dále je třeba vyjádřit se doporučeným hodnotám indexů C_p a C_{pk} dle [10], kdy je doporučená hodnota > 1 . V našem případě jsou indexy > 1 a lze tyto hodnoty bez problémů použít a proces lze uvést do výroby.

Pokud by došlo k nedodržení tolerancí ve smyslu překročení hodnoty stlačení kompenzačního elementu při Worst Case stavu $\Delta l = 0,3$ [mm], došlo by k nárůstu napětí a tím k překročení meze kluzu R_e [MPa] materiálu kompenzačního elementu a tím k plastickým deformacím v místě překročení meze kluzu. Tato možnost může nastat při výrobě jen velmi zřídka, protože křivka indexu způsobilosti procesu C_{pkT} se v hodnotě tolerance 0,3 blíží v pravděpodobnostním výskytu k nule.

Pokud by došlo k nedodržení tolerancí ve smyslu překročení dolní hodnoty, vznikla by vůle mezi kompenzačním elementem a hřídelí motoru a docházelo by k akustickému klikání. Tato možnost nastat nemůže, protože křivka způsobilosti procesu C_{pkT} se v hodnotě tolerance 0 již v pravděpodobnostním výskytu přiblížila k nule.

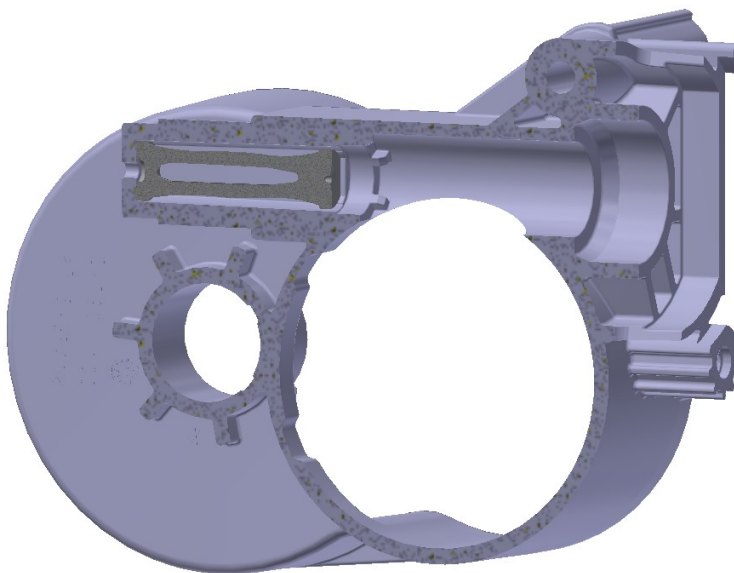
Z výpočtu vyplývá, že hodnoty tolerancí uvedených níže, jsou pro návrh stěžejní a je nutné tyto hodnoty pravidelně hlídat a měřit. K tomu slouží speciální charakteristiky, které nám reflektují požadavky na C_p a C_{pk} . V našem případě se bude jednat o označení viz Obr. 8.4.



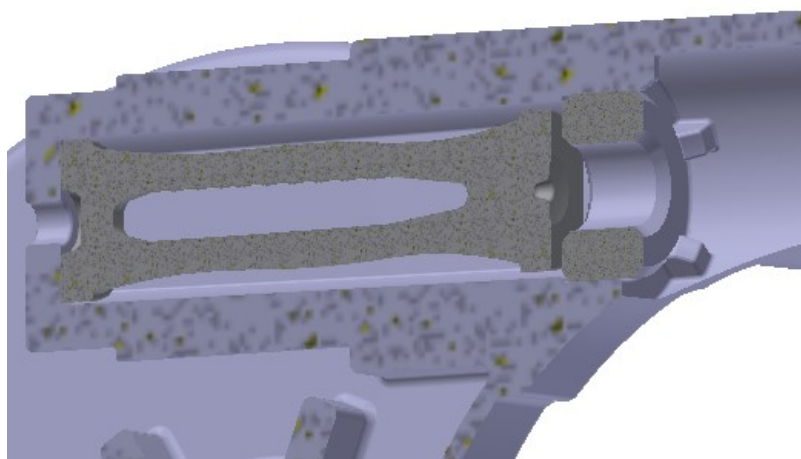
Obr. 8.4 Označení speciální charakteristiky pro délku motoru použitou do tolerančního výpočtu (diamant 03)

9. Předpokládaná montáž převodovky

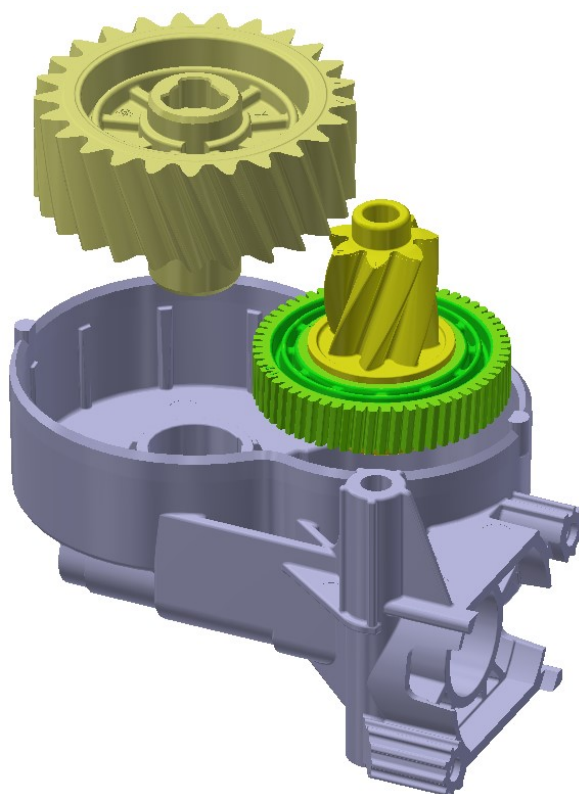
Tato kapitola popisuje předpokládanou montáž celé převodové skříně na výrobní lince, krok za krokem. Pro názornost jsou zde uvedeny pouze obrázky s příslušným popisem tak, aby bylo zřejmé, co se na montážní lince děje a kde se nachází navrhnutý komponent – kompenzační element.



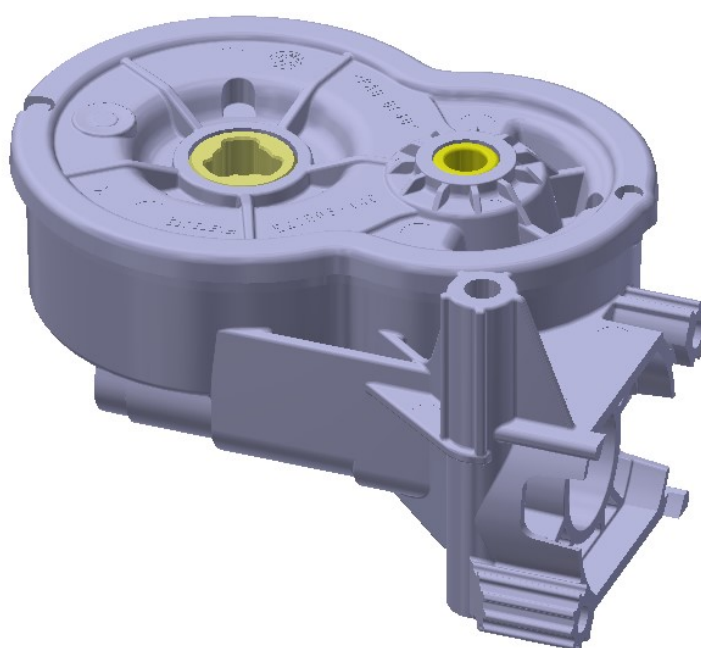
Obr. 9.1 Vložení kompenzačního elementu (zobrazeno v řezu)



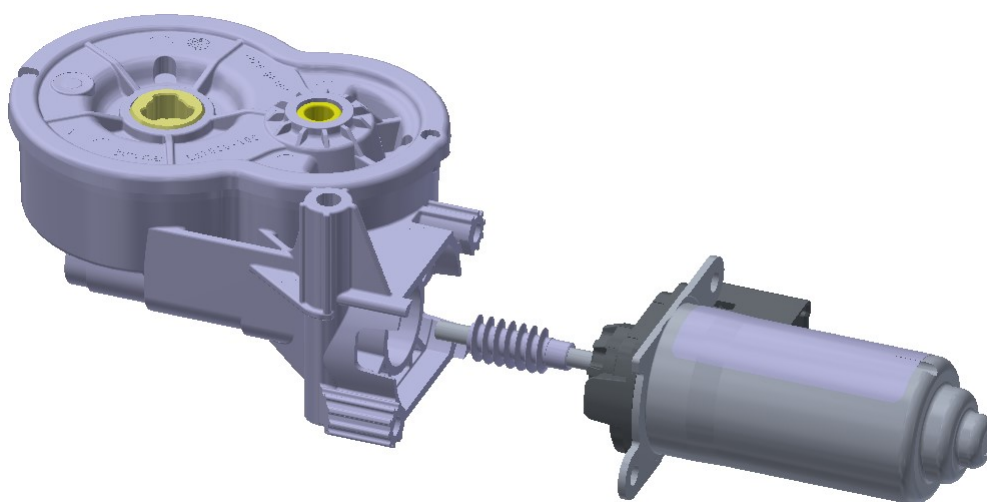
Obr. 9.2 Zalisování kluzného ložiska (zobrazeno v řezu)



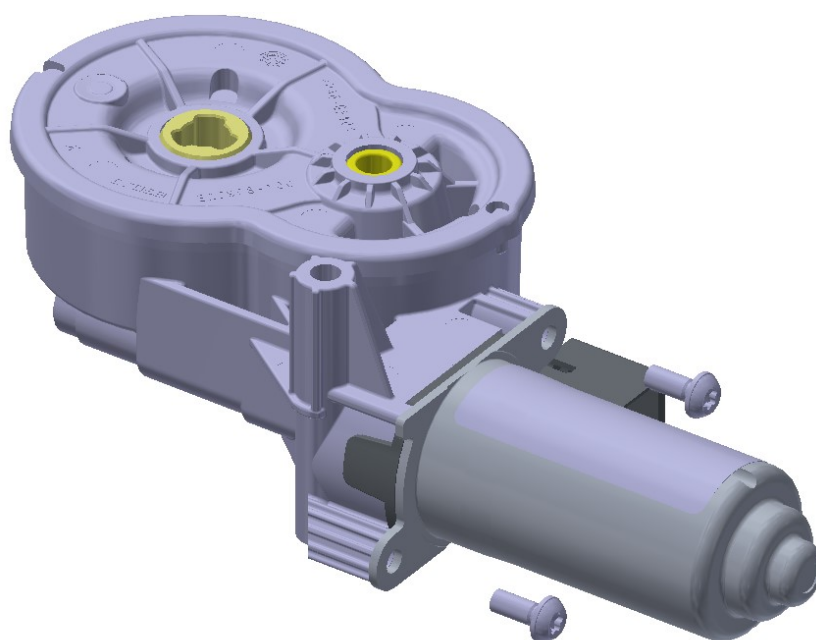
Obr. 9.3 Vložení ozubených kol



Obr. 9.4 Zavaření víka převodové skříně



Obr. 9.5 Vložení motoru



Obr. 9.6 Zašroubování šroubů

10. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zamezit jevu „akustické klikání“ hřídele motoru a využít k tomu umístění v plastové převodové skříni. V úvodu této práce byla zpracována technologie výroby – vstřikování plastů, dále zde byl uveden popis jevu „akustické klikání“ s možnými příklady výskytu tohoto jevu v praxi.

Pro vedoucím práce zadaný typ elektromotoru byla vypracována tři možná řešení zamezení akustickému klikání hřídele motoru. Z těchto tří řešení bylo pomocí vícekritériální analýzy vybráno jedno, které odpovídá požadavkům na velkosériovou výrobu.

Zvolené řešení bylo podrobně konstrukčně rozpracováno. Od prvního návrhu pro splnění požadavků na funkčnost, přes technologické úpravy odpovídající technologii výroby – vstřikování plastů, až po pevnostní kontrolu pomocí MKP software. Na tomto vybraném řešení byla také provedena toleranční analýza pomocí výpočtového software tak, aby byla způsobilost procesu co nejvyšší a tím co nejmenší zmetkovitost při výrobě. V neposlední řadě je v práci uvedena i předpokládaná montáž převodovky. Nakonec byla vypracována výkresová dokumentace obsahující: výrobní výkres kompenzačního elementu, sestavný výkres plastové převodové skříně a změněnou plastovou převodovou skříň.

Další možnosti a náměty

- Kompenzační element byl navrhnout pouze pomocí virtuálních nástrojů ve virtuálním prostředí, nyní je možnost prototyp tohoto výrobku otestovat skutečným zatížením a při skutečných podmínkách provozu.
- Technologií výroby prototypu je volen 3D tisk a to ze stejného, nebo mechanickými vlastnostmi podobného materiálu.
- Pokud by kontakt: ocelová hřídel motoru / plastový kompenzační element nevydržel při reálném testování tepelně nebo by se hřídel „zakousla“ do elementu, lze tento problém vyřešit obstríkem v tomto místě kompenzačního elementu z materiálu, o kterém je známo, že tento typ zatížení zvládne (výpočet této oblasti je ovšem garantován firmou).

11. Seznam použitých zdrojů a software

- [1] LENFELD, Petr. Technologie II, zpracování plastů. *Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [2] LENFELD, Petr. Technologie vstřikování plastů. *Technologie vstřikování* [online]. [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [3] MINÁŘ, Zdeněk. *Postup výroby plastových výrobků vstřikovací technologií* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129521/MIN0083_FS_B2341_2301R040_2018.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jiří Hrubý.
- [4] Brose [online]. 2020 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.brose.com/de-en/products/>
- [5] VLČEK, Tomáš. *Pásová jednotka mobilního robotu ARES* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/114707>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [6] MLÝNKOVÁ, Lenka. *Analýza aplikací Poka Yoke ve vybraném podniku*. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra kontroly a řízení jakosti. Vedoucí práce Darja Noskievičová.
- [7] CAMPUSplastics [online]. Frankfurt am Main: EMS-GRIVORY, 2017 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.campusplastics.com/>
- [8] *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; 2016, 2015 [cit. 2020-04-07]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>
- [9] *Tolerance Analysis - Enventive Engineering, Inc.* [online]. South Lancaster, MA 01561: Enventive Engineering [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://www.enventive.com/en/>
- [10] *Způsobilost procesu - Lean Six Sigma* [online]. Praha 3: Copyright © 2020 Lean Six Sigma, 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/zpusobilost-procesu/>

[11] *Statistická analýza dat* [online]. Praha 5: StatSoft CR, c2004-2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:
http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/13_08_07_StatSoft_Analyza_zpusobilosti_procesu.pdf

[12] R. HALAMA, L. ADÁMKOVÁ, F. FOJTÍK, K. FRYDRÝŠEK, M. ŠOFER, J. ROJÍČEK a M. FUSEK. *Pružnost a pevnost* [online]. Ostrava: ©Halama et al., 2011 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z:
http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_a_pevnost.pdf

Použitý software

[13] *Inventor*. [studentská verze programu]. Ver. Professional 2019. ©2018 Autodesk, Inc.

[14] *Enventive*. [plná verze programu]. Ver. 4.1.5. *Tolerance Analysis - Enventive Engineering, Inc.*